

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局



(43) 国際公開日
2004 年1 月15 日 (15.01.2004)

PCT

(10) 国際公開番号
WO 2004/006017 A1

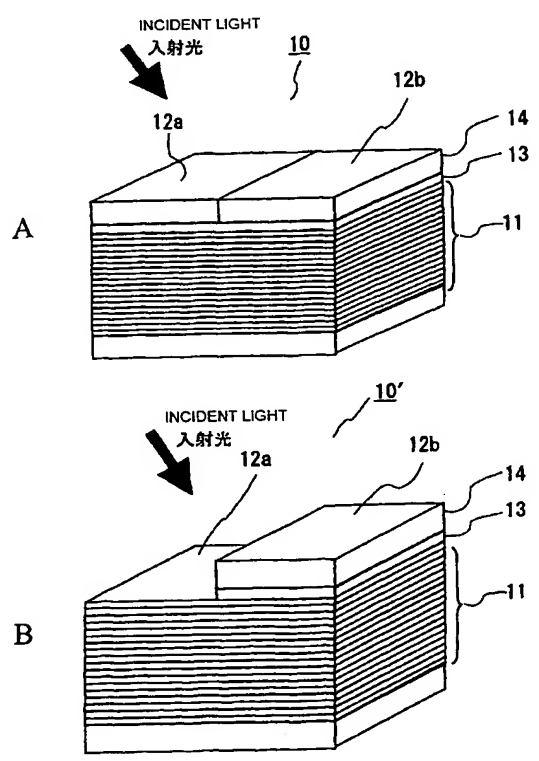
- (51) 国際特許分類⁷: G03F 1/16, H01L 21/027
(21) 国際出願番号: PCT/JP2003/008377
(22) 国際出願日: 2003 年7 月1 日 (01.07.2003)
(25) 国際出願の言語: 日本語
(26) 国際公開の言語: 日本語
(30) 優先権データ:
特願2002-193168 2002 年7 月2 日 (02.07.2002) JP
特願2002-200777 2002 年7 月10 日 (10.07.2002) JP
(71) 出願人 (米国を除く全ての指定国について): ソニー株式会社 (SONY CORPORATION) [JP/JP]; 〒141-0001 東京都品川区北品川6丁目7番35号 Tokyo (JP).

- (72) 発明者; および
(75) 発明者/出願人 (米国についてののみ): 菅原 稔 (SUGAWARA, Minoru) [JP/JP]; 〒141-0001 東京都品川区北品川6丁目7番35号 ソニー株式会社内 Tokyo (JP).
(74) 代理人: 中村 友之 (NAKAMURA, Tomoyuki); 〒105-0001 東京都港区虎ノ門1丁目2番3号 虎ノ門第一ビル9階 三好内外国特許事務所内 Tokyo (JP).
(81) 指定国 (国内): KR, US.
(84) 指定国 (広域): ヨーロッパ特許 (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IT, LU, MC, NL, PT, RO, SE, SI, SK, TR).
添付公開書類:
— 国際調査報告書

[続葉有]

(54) Title: PHASE SHIFT MASK AND PRODUCTION METHOD THEREFOR AND PRODUCTION METHOD FOR SEMI-CONDUCTOR DEVICE

(54) 発明の名称: 位相シフトマスクおよびその製造方法並びに半導体装置の製造方法



(57) Abstract: A phase shift mask for ultra-short ultraviolet ray capable of being actually constituted by properly combining refractive index and absorption coefficient even if a ultra-short ultraviolet ray is reflected. A phase shift mask (10) comprising a reflection multi-layer film substrate (11), and a first region (12a) and a second region (12b) formed on the substrate (11) is formed by specifying the phase and reflectance of a reflection light of a ultra-short ultraviolet ray obtained from an arbitrary complex refractive index for a ultra-short ultraviolet ray and an arbitrary film thickness. Respective film thicknesses and complex refractive indexes of a formed film in the first region (12a) and a formed film in the second region (12b) are set based on the specified results so as to produce a specified phase difference between the reflection light of a ultra-short ultraviolet ray in the first region (12a) and the reflection light of a ultra-short ultraviolet ray in the second region (12b).

(57) 要約: 極短紫外光を反射する場合であっても、適切な屈折率と吸収係数の組み合わせを得ることで、現実に構成することのできる極短紫外光の位相シフトマスクである。短紫外光を反射する反射多層膜基板(11)と、その反射多層膜基板(11)上に形成された第1領域(12a)および第2領域(12b)とを具備してなる位相シフトマスク(10)を構成するのにあたって、まず、極短紫外光に対する任意の複素屈折率と膜の任意の膜厚とについて、当該複素屈折率および当該膜厚から得られる極短紫外光の反射光の位相および反射率を特定する。そして、その特定結果を基にして、第1領域(12a)での極短紫外光の反射光と第2領域(12b)での極短紫外光の反射光とで所定の位相差が生じるように、第1領域(12a)の形成膜および第2領域(12b)の形成膜における各膜厚および各複素屈折率を設定する。

WO 2004/006017 A1



2文字コード及び他の略語については、定期発行される
各PCTガゼットの巻頭に掲載されている「コードと略語
のガイダンスノート」を参照。

明細書

位相シフトマスクおよびその製造方法並びに半導体装置の製造方法

5 技術分野

本発明は、半導体装置の回路パターンを形成するためのリソグラフィ工程にて用いられる位相シフトマスクおよびその製造方法、並びにそのリソグラフィ工程を含む半導体装置の製造方法に関し、特にいわゆる極短紫外光に対応した位相シフトマスクおよびその製造方法並びに半導体装置の製造方法に関する。

背景技術

近年、半導体装置の微細化に伴い、ウエハ上に形成される回路パターンやその回路パターンを形成するためのレジストパターン等に対しては、パターン幅（線幅）やパターン間のピッチ等の極小化が要求されている。このような極小化の要求については、レジストの露光に用いる紫外光の波長をより短波長にすることで対応が可能となる。例えば、350nm の設計ルール of 半導体装置には 365nm の波長、250nm および 180nm の設計ルール of 半導体装置には 248nm の波長、130nm および 100nm の設計ルール of 半導体装置には 193nm の波長といったように、半導体装置の微細化が進むほど、露光に用いる紫外光の波長も短波長化され、さらには 157nm の波長の紫外光が用いられるようになってきている。

一般に、これらの波長による解像度は、 $w = k_1 \times (\lambda / NA)$ というレイリーの式で表されることが知られている。ここで、 w は解像される最小幅のパターン、 NA は投影光学系のレンズの開口数、 λ は露光光の波長である。また、 k_1 は、主にレジストの性能および超解像技術

の選択等により決定されるプロセス定数であって、最適なレジストおよび超解像技術を用いれば $k_1 = 0.35$ 程度まで選択できることが知られている。なお、超解像技術とは、マスクを透過し、マスク上遮光パターンで回折された光の ± 1 次回折光を選択的に用いることにより、波長よりも小さなパターンを得ようとするものである。

このレイリーの式によれば、例えば 157nm の波長を用いた場合に対応が可能な最小のパターン幅は、 $NA = 0.9$ のレンズを用いるとすれば、 $w = 61\text{nm}$ となることがわかる。すなわち、 61nm よりも小さなパターン幅を得るためには、 157nm よりもさらに短波長の紫外光を用いる必要がある。

このことから、最近では、 157nm よりも短波長の紫外光として、極短紫外光 (EUV ; Extreme Ultra Violet) と呼ばれる 13.5nm の波長のものを用いることも検討されている。ただし、 157nm の波長の紫外光までは、例えば CaF_2 (フッ化カルシウム) や SiO_2 (二酸化ケイ素) といった光透過性のある材料が存在するため、当該紫外光を透過させる構成のマスクおよび光学系を作製することができる。ところが、 13.5nm の波長の極短紫外光については、当該極短紫外光を所望の厚さでもって透過させる材料が存在していない。そのため、 13.5nm の波長の極短紫外光を用いる場合には、光透過型のマスクおよび光学系ではなく、光を反射する反射型マスクおよび反射型光学系によって、マスクおよび光学系を構成する必要がある。

反射型マスクを用いた場合には、マスク面で反射された光が、そのマスクに入射される光と相互に干渉することなく、投影光学系に導かれねばならない。そのため、マスクに入射される光は、必然的にマスク面の法線に対して角度 ϕ を持った斜め入射となる必要が生じる。この角度は、投影光学系のレンズの開口数 NA 、マスク倍率 m 、照明光源の大き

さ σ から決まる。具体的には、例えばウエハ上に 5 倍の縮小倍率を持つマスクを用いた場合、 $NA=0.3$ 、 $\sigma=0.8$ の露光装置においては、光が $3.44 \pm 2.75^\circ$ の立体角を持ってマスク上に入射することになる。

また、ウエハ上に 4 倍の縮小倍率を持つマスクを用いた場合、 $NA=$

- 5 0.25 、 $\sigma=0.7$ の露光装置においては、光が $3.58 \pm 2.51^\circ$ の立体角を持ってマスク上に入射することになる。これらの立体角を考慮して、マスクに入射する露光光の入射角度は、通常 5° 近傍になるように設定される。ここで、入射角度は、マスク表面に対する法線となす角度として定義される。

- 10 このような反射型マスクにより 13.5nm の波長の極短紫外光を反射する場合、例えば $NA=0.25$ の露光装置においては、上述したレイリーの式から $k_1 \geq 0.6$ の条件であれば、 32.4nm の線幅を形成することができるようになる。すなわち、極短紫外光とその極短紫外光でのパターン転写を可能とする反射型マスクを用いることで、光透過型のマスクお
- 15 よび光学系では達成できなかったパターン幅やパターンピッチ等の極小化にも対応可能となるのである。

- ところで、近年では、微細化に対する要望が急速に進んでおり、パターン幅やパターンピッチ等の更なる極小化への対応が望まれている。例えば、特に小さなサイズの要求されるゲート線幅においては、 32.4nm
- 20 よりも小さなサイズの線幅、すなわち $k_1 < 0.6$ となる条件も要求されるようになってきている。具体的には、加工後ゲート線幅が 15nm で、レジスト上線幅においても 25nm 線幅が要求されるに至っている。この 25nm のレジスト線幅については、波長 13.5nm で $NA=0.25$ の露光装置の場合に、レイリーの式から $k_1=0.46$ となる。このようなサイズ
- 25 の線幅を形成する場合には、単に 13.5nm の波長の極短紫外光とこれを

反射する反射型マスクとを用いるだけでなく、超解像技術を用いることが必要とされる。

超解像技術としては、マスクパターンの±1次回折光を選択的に利用する①変形照明光源（輪帯照明や4つ穴照明等）や②瞳フィルター（輪帯フィルターや4つ穴フィルター等）の他に、③ハーフトーン型位相シフトマスク、④ハーフトーン型位相シフトマスクと変形照明光源の組み合わせ、または⑤レベンソン型位相シフトマスク（または「オルタネーティング位相シフトマスク」ともいう）を用いることが知られている。③、④および⑤（以下、ハーフトーン型位相シフトマスクおよびレベンソン型位相シフトマスクを「位相シフトマスク」と総称する）は、い

5

10

ずれも光の位相差を利用したものであり、解像性能を向上させ、またパターンコントラストを増大させる上で非常に有効であることから、リソグラフィ工程では①または②に比べて多く用いられている。

しかしながら、光を透過させる透過型マスクであれば、周知のように位相シフトマスクを構成することは容易であるが、極短紫外光に対応する反射型マスクの場合には、位相シフトマスクを構成することが非常に困難である。例えば、透過型マスクであればマスク基板を掘り込むことで光の位相差が互いに180°異なる領域を形成することができるが、これをそのまま反射型マスクに適用しても、マスク基板を掘り込むことで光の反射率も同時に変化してしまうため、位相シフトマスクを構成することはできない。また、透過型マスクであれば材料の位相シフト効果を利用することで光の位相差が互いに180°異なる領域を形成することができるが、これを反射型マスクに適用しても、極短紫外光の露光波長に対して吸収の無い材料は存在せず、単一材料では所望の反射率と位相シフト効果を奏する構成が得られないため、位相シフトマスクを構成することができない。さらには、極短紫外光の反射型マスクに用いられる反

15

20

25

射多層膜基板はSi（ケイ素）層とMo（モリブデン）層を交互に積層した構造（例えば40層の繰り返し）のものが一般的であることから、その積層順序が相互に逆になっている領域を別々に形成することで位相差が 180° で反射率が互いに等しい領域を構成することも提案されているが、そのような積層構造を作製することは甚だ困難であり未だそのような積層構造の位相シフトマスクは実用化されていない。これらのことから、極短紫外光に対応した反射型の位相シフトマスクについては、これを現実に構成することは不可能であると考えられてきた。

そこで、本発明は、極短紫外光の波長に対してはマスク用材料として適している材料の屈折率が0.89から1.01の間に存在していることを鑑み、適切な屈折率と吸収係数の組み合わせを得ることで、現実に構成することのできる極短紫外光の位相シフトマスクおよびその製造方法並びに半導体装置の製造方法を提供することを目的とする。

15 発明の開示

本発明は、上記目的を達成するために案出された露光光の位相シフトマスクで、露光光を反射して被露光体上に所望パターンを転写するために用いられる露光光の位相シフトマスクであって、露光光を反射する反射多層膜基板と、当該反射多層膜基板上に形成された第1領域および第2領域とを具備するとともに、前記第1領域の形成膜および前記第2領域の形成膜における各膜厚および各複素屈折率が、前記第1領域での露光光の反射光と前記第2領域での露光光の反射光とで所定の位相差が生じるように設定されていることを特徴とするものである。

また、本発明は、上記目的を達成するために案出された露光光の位相シフトマスクの製造方法で、露光光を反射する反射多層膜基板と、当該反射多層膜基板上に形成された第1領域および第2領域とを具備してな

る露光光の位相シフトマスクの製造方法であって、前記露光光に対する任意の複素屈折率と、前記反射多層膜基板上に形成する膜の任意の膜厚とについて、当該複素屈折率および当該膜厚から得られる前記露光光の反射光の位相および反射率を特定し、特定した位相および反射率に基づいて、前記第 1 領域での露光光の反射光と前記第 2 領域での露光光の反射光とで所定の位相差が生じるように、前記第 1 領域の形成膜および前記第 2 領域の形成膜における各膜厚および各複素屈折率を選定することを特徴とする。

また、本発明は、上記目的を達成するために案出された半導体装置の製造方法で、露光光の位相シフトマスクを用いて被露光体上に所望パターンを転写するリソグラフィ工程を含む半導体装置の製造方法であって、前記露光光に対する任意の複素屈折率と、前記反射多層膜基板上に形成する膜の任意の膜厚とについて、当該複素屈折率および当該膜厚から得られる前記露光光の反射光の位相および反射率を特定し、特定した位相および反射率に基づいて、前記反射多層膜基板上の第 1 領域での露光光の反射光と前記反射多層膜基板上の第 2 領域での露光光の反射光とで所定の位相差が生じるように、前記第 1 領域の形成膜および前記第 2 領域の形成膜における各膜厚および各複素屈折率を選定し、選定した複素屈折率および膜厚にて前記第 1 領域の形成膜および前記第 2 領域の形成膜をそれぞれ前記反射多層膜基板上に形成して、前記反射多層膜基板上に前記第 1 領域および前記第 2 領域を具備してなる露光光の位相シフトマスクを構成し、構成した露光光の位相シフトマスクを用いて被露光体上に所望パターンを転写することを特徴とする。

上記構成の露光光の位相シフトマスク、上記手順の位相シフトマスクの製造方法、および上記手順の半導体装置の製造方法では、反射多層膜基板上に形成される第 1 領域および第 2 領域について、露光光の反射光

に所定の位相差が生じるように、それぞれの膜厚および複素屈折率が設定されている。すなわち、設定された膜厚となるように第 1 領域の形成膜および第 2 領域の形成膜が成膜され、設定された複素屈折率となるように第 1 領域の形成膜および第 2 領域の形成膜の形成材料が選択されている。設定された複素屈折率とするには、各形成膜を、複数の材料からなる積層構造とすることで達成できる。このように、第 1 領域の形成膜および第 2 領域の形成膜における各膜厚および各複素屈折率を設定値に合わせることで、第 1 領域と第 2 領域とで露光光の反射光に所定（例えば 180° ）の位相差が生じる。

- 5
- 10 本発明は、露光光は極短紫外光、X 線、放射線、紫外線、又は、可視光であることを特徴とする。また、位相シフトマスクはハーフトーン型位相シフトマスク、又は、レベンソン型位相シフトマスクであることを特徴とする。

- 15 また、本発明は、第 1 領域の形成膜および第 2 領域の形成膜における各膜厚および各複素屈折率は、等位相線及び等反射率線を用いて設定され、等位相線は、前記複素屈折率の虚部を固定して求めることを特徴とする。

図面の簡単な説明

- 20 第 1 A 図乃至第 1 B 図は、本発明に係る位相シフトマスクの概略構成の一例を示す模式図である。

第 2 図は、本発明の第 1 実施形態における位相シフトマスクの製造手順を示すフローチャートである。

第 3 図は、等位相線の一具体例を示す説明図である。

- 25 第 4 図は、等反射率線の一具体例を示す説明図である。

第5図は、ハーフトーン型位相シフトマスクを得るためのRu膜厚およびTa₂N膜厚に対する合成複素屈折率の実部の分布を示す説明図である。

第6図は、ハーフトーン型位相シフトマスクにおけるトータル膜厚と合成複素屈折率の実部（n）および反射率（k）の関係を示す説明図である。

第7図は、ハーフトーン型位相シフトマスクにおけるトータル膜厚とRu膜厚およびTa₂N膜厚との関係を示す説明図である。

第8図は、ハーフトーン型位相シフトマスクを得るためのRu膜厚およびTa₂N膜厚に対する合成複素屈折率の虚部の分布を示す説明図である。

第9図は、Ru層の膜厚とTa₂N層の膜厚に対する位相差およびハーフトーン反射率をマトリクス状に配した例を示す説明図である。

第10図は、Ru層の膜厚とCr層の膜厚に対する位相差をマトリクス状に配した例を示す説明図である。

第11図は、Ru層の膜厚とCr層の膜厚に対するハーフトーン反射率をマトリクス状に配した例を示す説明図である。

第12図は、ハーフトーン型位相シフトマスクのNA=0.25の場合におけるマスク上30nm（ウエハ上座標で表示）の開口部を具備するホールパターンの光強度分布を示す説明図である。

第13図は、ハーフトーン型位相シフトマスクの構成例の断面構造を示す模式図である。

第14図は、本発明の第2の実施の形態における位相シフトマスクの製造手順を示すフローチャートである。

第15図は、等位相線の一具体例を示す説明図である。

第 1 6 図は、レベンソン型位相シフトマスクの構成例（構造 1）の断面構造を示す模式図である。

第 1 7 図は、構造 1 のレベンソン型位相シフトマスクにおいて膜内多重干渉を考慮した位相と反射率の最適化（ M の膜厚をパラメータとしている）の例を示す説明図である。

第 1 8 図は、構造 1 のレベンソン型位相シフトマスクにおける光強度分布を示す説明図である。

第 1 9 図は、構造 1 のレベンソン型位相シフトマスクの位相差（ U 以上で表示）を示す説明図である。

10 第 2 0 図は、構造 1 のレベンソン型位相シフトマスクの成膜手順の一例を示す説明図（その 1）である。

第 2 1 図は、構造 1 のレベンソン型位相シフトマスクの成膜手順の一例を示す説明図（その 2）である。

15 第 2 2 図は、構造 1 のレベンソン型位相シフトマスクの成膜手順の一例を示す説明図（その 3）である。

第 2 3 図は、構造 1 のレベンソン型位相シフトマスクの成膜手順の一例を示す説明図（その 4）である。

第 2 4 図は、レベンソン型位相シフトマスクの他の構成例（構造 2）の断面構造を示す模式図である。

20 第 2 5 図は、構造 2 のレベンソン型位相シフトマスクにおいて膜内多重干渉を考慮した位相と反射率の最適化（ M の膜厚をパラメータとしている）の例を示す説明図である。

第 2 6 図は、構造 2 のレベンソン型位相シフトマスクにおける光強度分布を示す説明図である。

25 第 2 7 図は、構造 2 のレベンソン型位相シフトマスクの位相差（ U 以上で表示）を示す説明図である。

第 28 図は、レベンソン型位相シフトマスクのさらに他の構成例（構造 3）の断面構造を示す模式図である。

第 29 図は、構造 3 のレベンソン型位相シフトマスクにおいて膜内多重干渉を考慮した位相と反射率の最適化（ M の膜厚をパラメータとしている）の例を示す説明図である。

第 30 図は、構造 3 のレベンソン型位相シフトマスクにおける光強度分布を示す説明図である。

第 31 図は、構造 3 のレベンソン型位相シフトマスクの位相差（ウェハ上で表示）を示す説明図である。

10 第 32 図は、レベンソン型位相シフトマスクの第 1 領域と第 2 領域とが平坦な構成例（構造 4）の断面構造を示す模式図である。

第 33 図は、構造 4 のレベンソン型位相シフトマスクにおいて膜内多重干渉を考慮した位相と反射率の最適化（ M の膜厚をパラメータとしている）の例を示す説明図である。

15 第 34 図は、構造 4 のレベンソン型位相シフトマスクにおける光強度分布を示す説明図である。

第 35 図は、構造 4 のレベンソン型位相シフトマスクの位相差（ウェハ上で表示）を示す説明図である。

20 第 36 図は、構造 4 のレベンソン型位相シフトマスクの成膜手順の一例を示す説明図（その 3）である。

第 37 図は、構造 4 のレベンソン型位相シフトマスクの成膜手順の一例を示す説明図（その 4）である。

第 38 図は、レベンソン型位相シフトマスクの他の平坦な構成例（構造 5）の断面構造を示す模式図である。

第39図は、構造5のレベンソン型位相シフトマスクにおいて膜内多重干渉を考慮した位相と反射率の最適化（ M ：膜厚をパラメータとしている）の例を示す説明図である。

第40図は、構造5のレベンソン型位相シフトマスクにおける光強度分布を示す説明図である。

第41図は、構造5のレベンソン型位相シフトマスクの位相差（ウエハ上で表示）を示す説明図である。

第42図は、レベンソン型位相シフトマスクのさらに他の平坦な構成例（構造6）の断面構造を示す模式図である。

10 第43図は、構造6のレベンソン型位相シフトマスクにおいて膜内多重干渉を考慮した位相と反射率の最適化（ M ：膜厚をパラメータとしている）の例を示す説明図である。

第44図は、構造6のレベンソン型位相シフトマスクにおける光強度分布を示す説明図である。

15 第45図は、構造6のレベンソン型位相シフトマスクの位相差（ウエハ上で表示）を示す説明図である。

第46図は、構造5のレベンソン型位相シフトマスクにおけるマスク上 Ta 幅（ウエハ上で表示）に対する光強度分布（ $NA=0.25$ ）を示す説明図である。

20 第47図は、従来のバイナリマスクにおけるマスク上 Ta 幅（ウエハ上で表示）に対する光強度分布（ $NA=0.25$ ）を示す説明図である。

第48図は、構造5のレベンソン型位相シフトマスクにおけるマスク上 Ta 幅（ウエハ上で表示）に対する光強度分布（ $NA=0.30$ ）を示す説明図である。

以下、図面に基づき本発明に係る露光光の位相シフトマスクおよびその製造方法並びに半導体装置の製造方法について、露光光を極短紫外光とした場合を例にとり、説明する。なお、当然のことではあるが、本発明は、以下に述べる実施の形態に限定されるものではない。

5 〔位相シフトマスクの概略構成の説明〕

10 まず、本発明に係る極短紫外光の位相シフトマスクの概略構成について説明する。ここで説明する位相シフトマスクは、半導体装置の製造方法における一工程であるリソグラフィ工程にて、極短紫外光を反射してウエハ等の被露光体上に所望パターン（例えば回路パターン）を転写するために用いられるものである。なお、ここで言う「極短紫外光」には、例えば波長が13.5nmのものに代表されるように、従前のリソグラフィ工程で用いられていた紫外光よりも短波長（例えば、1nm以上100nm以下）のものが該当する。

15 第1A図乃至第1B図は、本発明に係る位相シフトマスクの概略構成の一例を示す模式図である。図例のように、位相シフトマスク10、10'は、極短紫外光を反射する反射多層膜基板（マスクブランクス）11と、その反射多層膜基板11上に形成された第1領域12aおよび第2領域12bとを具備したものである。

20 反射多層膜基板11は、例えばSi（ケイ素）層とMo（モリブデン）層とを交互に積層した構造で構成されるが、その積層の繰り返し数が40層であるものが一般的である。また、Si層およびMo層の合計の厚さとMo層の厚さとの比 Γ は、 $\text{Mo層厚} / (\text{Si層厚} + \text{Mo層厚}) = 0.4$ が適切であることが知られている。したがって、反射多層膜基板11では、露光に用いる極短紫外光の波長 λ を13.5nmとすると、
25 Si層とMo層の合計の膜厚が $(\lambda / 2) / (0.9993 \times 0.6 +$

$0.9211 \times 0.4) = 6.973 \text{ nm}$ 、 Si 層の厚さが $6.9730 \times 0.6 = 4.184 \text{ nm}$ 、 Mo 層の厚さが $6.9730 \times 0.4 = 2.789 \text{ nm}$ となる。

この反射多層膜基板 11 上には、バッファ膜 13 を介して吸収膜 14 が形成されている。バッファ膜 13 は、吸収膜を形成する際のエッチングストップパとして、あるいは吸収膜形成後の欠陥除去時のダメージ回避を目的として設けられているもので、例えば Ru （ルテニウム）層や SiO_2 （二酸化ケイ素）によって構成される。吸収膜 14 は、極短紫外光を吸収する材料からなるもので、例えば TaN （タンタルナイトライド）層によって構成される。ただし、吸収膜 14 は、極短紫外光のマスク用材料として用いることのできるものであれば、他の材料からなるものであってもよい。具体的には、 TaN 以外に Ta （タンタル）または Ta 化合物、 Cr （クロム）または Cr 化合物、 W （タングステン）または W 化合物等が考えられる。

ところで、反射多層膜基板 11 上には、第 1 領域 12a および第 2 領域 12b が形成されている。第 1 領域 12a と第 2 領域 12b とでは、それぞれでの極短紫外光の反射光に、所定（例えば 180° ）の位相差が生じるようになっている。

そのために、第 1 領域 12a と第 2 領域 12b とでは、後述するように、それぞれにおける形成膜（バッファ膜 13 + 吸収膜 14）の構成材料またはその膜厚が異なる（第 1A 図参照）。ただし、いずれか一方の領域のみにバッファ膜 13 および吸収膜 14 を形成することによって、各領域 12a、12b に位相差が生じるようにしたものであってもよい（第 1B 図参照）。

第 1 領域 12a と第 2 領域 12b との位相差 ψ は、第 1 領域 12a における入射光と反射光の位相差を ϕ_1 、第 2 領域 12b における入射

光と反射光の位相差を ϕ_2 、第 1 領域 1 2 a と第 2 領域 1 2 b との膜厚の差を h とすると、以下に示す (1) 式によって特定することができる。

$$\psi(\lambda) = \phi_1(\lambda) - \phi_2(\lambda) + (4\pi h \cos \theta) / \lambda \quad \dots (1)$$

5 この (1) 式において、 θ は、マスクに入射する光がマスク面上法線に対してなす角度である。 λ は露光中心波長である。 ϕ_1 および ϕ_2 は、例えば “Yamamoto

and T.Namioka” “Layer-by-layer design method for soft-x-ray multilayers”, Applied Optics, Vol.31 pp1622-

10 1630, (1992) で開示されている方法で求めればよい。

また、(1) 式を用いて位相差 $\psi(\lambda)$ を求めるためには、第 1 領域 1 2 a と第 2 領域 1 2 b の形成材料の複素屈折率が必要である。極短紫外光の露光中心波長が 13.5nm である場合において、形成材料の複素屈折率は、例えば Mo : 0.92108-0.00643543i、Si : 0.9993-

15 0.00182645i、Ru : 0.88749-0.0174721i、Ta N : 0.94136-

0.0315738i となる。形成材料が任意の m 層の積層構造で構成されている場合には、以下に示す (2) 式および (3) 式によって得られる合成複素屈折率を用いればよい。

$$n = \frac{\sum_1^m n_m d_m}{\sum_1^m d_m} \quad \dots (2)$$

20

$$k = \frac{\sum_1^m k_m d_m}{\sum_1^m d_m} \quad \dots (3)$$

このようにして特定される位相差 ψ が第1領域12aと第2領域12bとで所定値（例えば 180° ）となるように、位相シフトマスク10, 10'では、第1領域12aおよび第2領域12bにおける形成膜（パツファ膜13+吸収膜14）の構成材料（特に複素屈折率）およびその膜厚が設定されているのである。つまり、本実施形態で説明する位相シフトマスク10, 10'は、第1領域12aの形成膜および第2領域12bの形成膜における各膜厚および各複素屈折率が、第1領域12aでの極短紫外光の反射光と第2領域12bでの極短紫外光の反射光とで所定の位相差が生じるように設定されている点に、大きな特徴がある。

10 〔位相シフトマスクの製造手順の説明〕

次に、以上のような特徴を持つ位相シフトマスク10, 10'について、その製造手順を説明する。ただし、ここでは、その製造手順を第1の実施の形態と第2の実施の形態とに分けて説明する。

〔第1の実施の形態〕

15 第1の実施の形態では、本発明を適用してハーフトーン型位相シフトマスクを構成する場合を例に挙げて説明する。第2図は、第1の実施の形態における位相シフトマスクの製造手順を示すフローチャートである。

ハーフトーン型位相シフトマスクの製造にあたっては、先ず、各複素屈折率に対する等位相線および等反射率線を求める（ステップ101、
20 以下ステップを「S」と略す）。これら等位相線および等反射率線は、既存の材料に限定することなく、任意の複素屈折率に対して求めておく。つまり、極短紫外光に対する任意の複素屈折率について、その複素屈折率から得られる極短紫外光の反射光の位相および反射率を特定する。なお、複素屈折率に対する位相および反射率は、理論的に一意的に特定す
25 ることができる。また、任意の複素屈折率には、反射多層膜基板11の

複素屈折率も含むものとする。すなわち、等位相線および等反射率線は、反射多層膜基板 11 に対しても求めておく。

第 3 図は、等位相線の一具体例を示す説明図である。図例の等位相線は、複素屈折率の虚部 (k) を 0.0100i に固定して求めている。また、

- 5 第 4 図は、等反射率線の一具体例を示す説明図である。図例の等反射率線は、複素屈折率の実部 (n) を 0.9100 に固定して求めている。なお、これらの等位相線および等反射率線において、(1) 式の λ で表される露光波長は 13.5nm であり、 θ で表されるマスク上への斜め入射光の入射角度は 4.84° である。

- 10 反射率および位相は複素屈折率の実部および複素屈折率の虚部それぞれに依存するが、位相は主に複素屈折率の実部に依存し、反射率は主に複素屈折率の虚部に依存する。したがって、最終的に第 1 領域 12a と第 2 領域 12b とで 180° の位相差および所望の反射率を得るためには、近似的にこれら第 3 図の等位相線および第 4 図の等反射率線を用いて、
- 15 各領域 12a, 12b の構成材料の複素屈折率または膜厚を設定すればよい。あるいは、複素屈折率および膜厚の両方を設定するようにしてもよい。

- 複素屈折率または膜厚の設定にあたっては、まず、反射多層膜基板 11 上の第 1 領域 12a および第 2 領域 12b に加工可能な材料および膜
- 20 構成を求める (S102)。そして、第 1 領域 12a の材料構成における複素屈折率と、第 2 領域 12b の材料構成における複素屈折率とを、それぞれ求める (S103, S104)。

- ここで、例えば第 1 B 図に示した構成のハーフトーン型位相シフトマスク 10'、すなわち第 2 領域 12b にのみバッファ膜 13 を介して吸
- 25 収膜 14 が形成され、第 1 領域 12a と第 2 領域 12b とで 180° の位相差が生じる位相シフトマスクを構成する場合を考える。このとき、第

1 領域 1 2 a と第 2 領域 1 2 b とでは、それぞれ所望の反射率（互いに異なる値）が得られるものとする。また、第 2 領域 1 2 b では、バッファ膜 1 3 の構成材料として R u を、吸収膜 1 4 の構成材料として T a N を、それぞれ選択しているものとする。

- 5 第 5 図は、R u 膜厚と T a N 膜厚に対する複素屈折率の実部の分布を示す説明図である。図例からは、R u 膜厚が 1 nm から 20 nm および T a N 膜厚が 1 nm から 50 nm の間において、合成複素屈折率の実部が 0.890 から 0.945 の間の値を取り得ることがわかる。つまり、第 5 図の内容から、第 2 領域 1 2 b の材料構成における複素屈折率がわかること
10 になる。なお、第 1 領域 1 2 a については、バッファ膜 1 3 および吸収膜 1 4 が形成されていないので、反射多層膜基板 1 1 の積層構造から複素屈折率を求めればよい。

- それぞれの複素屈折率を求めた後は、その第 1 領域 1 2 a における屈折率および第 2 領域 1 2 b における屈折率と、既に求めている等位相線
15 とから、第 1 領域 1 2 a と第 2 領域 1 2 b との形成膜の段差、すなわち第 2 領域 1 2 b の形成膜の膜厚を求める（S 1 0 5）。具体的には、第 5 図の複素屈折率分布および第 3 図の等位相線図を基にすれば、反射多層膜基板 1 1 との位相差が 180° となるための形成膜（バッファ膜 1 3 + 吸収膜 1 4）のトータル膜厚と合成複素屈折率の実部（ n ）との関係
20 が、第 6 図に示すように一意的に求まる。また、反射多層膜基板 1 1 との位相差が 180° となるための R u 層（バッファ膜 1 3）と T a N 層（吸収膜 1 4）のそれぞれの膜厚は、合成複素屈折率が位相差 180° を与える条件から、第 7 図に示すように一意的に求まる。これらのようにして、第 2 領域 1 2 b の形成膜の膜厚、すなわち R u 層および T a N 層
25 の膜厚を求めればよい。

Ru層およびTa₂N層のそれぞれの膜厚が求まると、次いで、第1領域12aの形成膜と第2領域12bにおける極短紫外光の反射率を求める(S106)。反射率は、Ru層およびTa₂N層の各膜厚からトータル膜厚に対する合成複素屈折率の虚部(k)を求め、その合成複素屈折率の虚部から反射率を求めればよい。第8図は、Ru層およびTa₂N層の各膜厚と、トータル膜厚に対する合成複素屈折率の虚部(k)との関係を示す説明図である。また、複素屈折率の虚部(k)がわかれば、反射率は、第4図に示した等反射率線から一意的に求まる。第6図には、合成複素屈折率虚部(k)および反射率とトータル膜厚との関係をも併せて示している。

ここで、例えば、反射率を0.075に設定する場合は、第6図の内容からトータル膜厚43nmであり、このとき第7図の内容からRu層の膜厚14nmおよびTa₂N層の膜厚29nmが最も近い条件として得られる。この膜厚において、以下に述べるように、さらに合成複素屈折率の正確な値を用いて位相差および反射率を求めることで、位相差182.4°および反射率0.075のハーフトーン型位相シフトが得られるようになる。

ただし、第6図の内容によれば、反射率を0.075に設定する場合の膜厚条件は、トータル膜厚が46.3nmおよび48.3nm近傍にも存在していることがわかる。つまり、トータル膜厚は、複素屈折率から単一の条件として定まるものではないので、以下に述べる膜厚調整を含めて様々な条件を総合的に勘案してように定めるようにすればよい。このとき、マスク製造における膜厚ばらつきに対する複素屈折率に対するプロセス余裕度を大きく確保するためには、図中においてトータル膜厚の変化が平坦な部分(例えば50.5nm付近)に設定することが望ましい。このようにすれば、±1.5nm程度の範囲でトータル膜厚がばらついても、複素屈折率は変化しないので、位相差および反射率も変化しないからである。

その後は、第1領域12aと第2領域12bとで 180° の位相および所望の反射率が得られるように、さらに膜厚の調整を行う（S107, S108）。ここで膜厚の調整を行う更なる理由は、第6図で考慮していない膜内多重干渉効果も含めて所望の位相および反射率を得るためである。具体的には、Ru層の膜厚とTa₂N層の膜厚をそれぞれ適宜変化させた場合の各位相差と各ハーフトーン反射率を、上述したような手順で求める。第9図は、Ru層の膜厚とTa₂N層の膜厚に対する位相差およびハーフトーン反射率をマトリクス状に配した例を示す説明図である。ここで、ハーフトーン反射率とは、第1B図の位相シフトマスク10'において、第1領域12aの反射率と第2領域12bの反射率との差である。そして、これらの結果から、所望の位相差とハーフトーン反射率を満たすウインドウ、すなわち調整後の膜厚の設定値を選択すればよい。なお、図例では、位相差 $180.0 \pm 6^\circ$ およびハーフトーン反射率 $9.0 \pm 1\%$ 、および位相差 $180.0 \pm 6^\circ$ およびハーフトーン反射率 $5.0 \pm 1\%$ の場合を例示している（図中のシャドウ部参照）。これにより、例えば、Ru層の膜厚13nm およびTa₂N層の膜厚30nm と設定すれば、位相差 179.4° およびハーフトーン反射率9.5%のハーフトーン型位相シフトが得られるようになる。ここで、反射率は、0.0070で第6図で予測されたものと略一致する。第10図および第11図は、Ru層の膜厚とCr層の膜厚に対する位相差およびハーフトーン反射率をマトリクス状に配した別の例である。これにより、例えば、Ru層の膜厚9nm およびCr層の膜厚を34nm と設定すれば、位相差 179.2° およびハーフトーン反射率4.1%のハーフトーン型位相シフトマスクが得られるようになる。

このようにして第2領域12bの形成膜の複素屈折率および膜厚を設定した後には、その設定に従いつつ反射多層膜基板11上に当該形成膜

を成膜することで、ハーフトーン型位相シフトマスクを構成すればよい。
なお、形成膜の成膜については、周知技術を用いて行えばよいので、ここではその説明を省略する。

つまり、反射多層膜基板 1 1 上に形成する第 2 領域 1 2 b を構成する
5 材料群の膜厚および複素屈折率の実部から当該第 2 領域 1 2 b における
反射多層膜基板 1 1 との位相差を求め、また第 2 領域 1 2 b を構成する
材料群の膜厚および複素屈折率の虚部から当該第 2 領域 1 2 b における
反射率を求め、これらから第 1 領域 1 2 a (反射多層膜基板 1 1) と第
2 領域 1 2 b における位相差が 180° 異なり、かつ、第 2 領域 1 2 b の
10 反射率が所望の値である構成、すなわち上述した構成のハーフトーン型
位相シフトマスクを得るのである。ただし、位相差と反射率は、どちら
を先に求めるようにしても構わない。

このような手順で得られるハーフトーン型位相シフトマスクを用いた
場合の光強度分布について説明する。第 1 2 図は、光学条件が $NA =$
15 0.25 、 $\sigma = 0.70$ である場合に、マスク上 30nm (ウエハ上座標で表示、
4 倍マスクでは 120nm) の開口部を具備するホールパターンにおける光
強度分布を示す説明図である。図例では、比較のため、従来のバイナリ
マスクに対する光強度分布も併せて示している。図例によれば、ハーフ
トーン型位相シフトマスクを用いた場合には、従来のバイナリマスクに
20 比べてパターンエッジコントラストが向上する効果が得られることが明
らかである。

なお、ここでは、ハーフトーン型位相シフトマスクとして、第 1 B 図
に示した構成の位相シフトマスク 1 0'、すなわち第 2 領域 1 2 b にの
みバッファ膜 1 3 および吸収膜 1 4 が形成されたものを例に挙げたが、
25 例えば第 1 A 図に示すようなハーフトーン型位相シフトマスク 1 0 を構
成することも可能である。ただし、その場合であっても、上述したよう

に、第1領域12aと第2領域12bとでは、 180° の位相差が生じるように、それぞれにおける形成膜の膜厚および複素屈折率が設定されているものとする。

第13図は、ハーフトーン型位相シフトマスクの構成例の断面構造を示す模式図である。図例のマスクでは、反射多層膜基板11上にて、第1領域12aにはRu10nm、Si47nmが順に積層され、第2領域12bにはRu5nm、Ta47nm、Ru5nmが順に積層されている。第1領域12aの形成膜の構成材料にSiを用いたのは、以下に述べる理由による。Siの複素屈折率は $0.99932-0.00182645i$ であり、その実部は真空中の屈折率である1に極めて近く、またその虚部は他材料と比較して小さい。したがって、Si材料には、その膜内多重干渉効果を利用することにより、位相差および反射率比を調整する役割を担わせることができるからである。膜内多重干渉効果を利用することによって、第1領域12aと第2領域12bとで 180° の位相差が生じ、しかもその上面が完全に平坦なフラット構造のハーフトーン型位相シフトマスクを構成することが可能となる。

〔第2の実施の形態〕

次に、位相シフトマスクの製造手順の第2の実施の形態について説明する。第2の実施の形態では、本発明を適用してレベンソン型位相シフトマスクを構成する場合を例に挙げて説明する。第14図は、第2の実施の形態における位相シフトマスクの製造手順を示すフローチャートである。

第14図に示すように、レベンソン型位相シフトマスクの製造も、上述した第1の実施の形態におけるハーフトーン型位相シフトマスクの場合（第2図参照）と略同様にして行う（S201～S208）。ただし、レベンソン型位相シフトマスクは、第1領域12aと第2領域12bに

における位相が 180° 異なるだけではなく、第 1 領域 1 2 a と第 2 領域 1 2 b における反射率が略等しい点で、ハーフトーン型位相シフトマスクとは異なる。つまり、レベンソン型位相シフトマスクを構成する場合には、①第 1 領域 1 2 a と第 2 領域 1 2 b とで反射率が略等しいこと、②
5 第 1 領域 1 2 a と第 2 領域 1 2 b との位相差が 180° であること、の 2 条件を満足しなければならない (S 2 0 8)。

これらの条件を満足するか否かの判定は、次のようにして行えばよい。まず、第 1 領域 1 2 a の反射率を R_1 、第 2 領域 1 2 b の反射率を R_2 とした場合に、以下に示す (4) 式によって得られる反射率比 P を特定す
10 る。

$$P = (1 - R_1(\lambda) / R_2(\lambda)) \times 100 \quad (\%) \quad \cdots (4)$$

そして、特定した反射率比 P に対して、判定基準 1 : $|P| \leq 3.0\%$ を適用し、この判定基準 1 に合致していれば、上記①の条件を満足して
15 いると判定する。

また、上記②の条件については、第 1 の実施の形態で説明した (1) 式によって得られる $\psi(\lambda)$ に対して、判定基準 2 : $|\psi(\lambda)| \leq 6^\circ$ を適用する。そして、この判定基準 2 に合致していれば、上記②の条件を満足していると判定する。

20 このようにして得られるレベンソン型位相シフトマスクとしては、第 1 A 図に示した構成のもの、すなわち第 1 領域 1 2 a および第 2 領域 1 2 b のいずれにもバッファ膜 1 3 および吸収膜 1 4 が形成された構成のものが考えられる。

ここで、第 1 A 図に示す構成のレベンソン型位相シフトマスクの製造
25 手順について、具体例を挙げてさらに詳しく説明する。レベンソン型位

相シフトマスクを構成する場合にも、第 1 の実施の形態で説明したハーフトーン型位相シフトマスクの場合と同様に、先ず、任意の複素屈折率に対する等位相線および等反射率線を求める。第 15 図は、等位相線の一具体例を示す説明図である。図例の等位相線は、複素屈折率の虚部

5 (k) を $0.0100i$ に固定して求めている。

ところで、レベンソン型位相シフトマスクでは、第 1 領域 12 a の形成膜と反射多層膜基板 11 との位相差 $\psi_1(\lambda)$ が、以下に示す (5) 式によって特定される。

$$\psi_1(\lambda) = \phi_1(\lambda) - \phi_s(\lambda) + (4\pi n_1 \cos \theta) / \lambda \quad \dots (5)$$

10

また、第 2 領域 12 b の形成膜と反射多層膜基板 11 との位相差 $\psi_2(\lambda)$ が、以下に示す (6) 式によって特定される。

$$\psi_2(\lambda) = \phi_2(\lambda) - \phi_s(\lambda) + (4\pi n_2 \cos \theta) / \lambda \quad \dots (6)$$

15 したがって、第 1 領域 12 a と第 2 領域 12 b の位相差 $\psi(\lambda)$ は、以下に示す (7) 式によって特定されることになる。

$$\psi(\lambda) = \psi_1(\lambda) - \psi_2(\lambda) \quad \dots (7)$$

この (7) 式によって特定される関係は、第 15 図に示したように、
20 等位相線の相対関係で表される。例えば、図中において、複素屈折率の実部が 0.94 であるような材料で、第 1 領域 12 a と第 2 領域 12 b の位相差が 180° であるためには、第 1 領域 12 a と第 2 領域 12 b の段差は 56nm であれば良いことがわかる (図中 [1] 参照)。また、複素

屈折率の実部が第 1 領域 1 2 a において 0.96、第 2 領域 1 2 b において 0.94 であるような材料で、第 1 領域 1 2 a と第 2 領域 1 2 b の位相差が 180° であるためには、第 1 領域 1 2 a と第 2 領域 1 2 b の段差は 42nm であれば良いことがわかる（図中 [2] 参照）。一方、反射率を
5 求める場合は、相対値ではなくトータル膜厚に対する絶対値をそのまま用いる。

レベンソン型位相シフトマスクを構成する場合にも、このような等位相線（第 1 5 図参照）および等反射率線（第 4 図参照）を基に、判定基準 1 および判定基準 2 を満たすような形成膜の膜厚および複素屈折率を
10 設定すればよい。

つまり、反射多層膜基板 1 1 上に形成する第 1 領域 1 2 a を構成する材料群の膜厚および複素屈折率の実部から第 1 領域 1 2 a における反射多層膜基板との位相差を求め、さらには反射多層膜基板 1 1 上に形成する第 2 領域 1 2 b を構成する材料群の膜厚および複素屈折率の実部から
15 第 2 領域 1 2 b における反射多層膜基板との位相差を求める。また、反射多層膜基板 1 1 上に形成する第 1 領域 1 2 a を構成する材料群の膜厚および複素屈折率の虚部から第 1 領域 1 2 a における反射率を求め、さらには反射多層膜基板 1 1 上に形成する第 2 領域 1 2 b を構成する材料群の膜厚および複素屈折率の虚部から第 2 領域 1 2 b における反射率を
20 求める。そして、これらの結果から、判定基準 1 および判定基準 2 を満たす構成、すなわち第 1 領域 1 2 a と第 2 領域 1 2 b における位相差が 180° 異なり、かつ、第 1 領域 1 2 a と第 2 領域 1 2 b の反射率が略等しい構成を、レベンソン型位相シフトマスクとして得るのである。なお、位相差と反射率は、どちらを先に求めるようにしても構わない。

25 ところで、判定基準 1 および判定基準 2 を同時に満たすためには、異なった材料を適切に積層して第 1 領域 1 2 a および第 2 領域 1 2 b の形

成膜を成膜する必要がある。これは、現実存在する材料の複素屈折率の制約から、異なった材料を適切に積層しなければ、判定基準 1 および判定基準 2 を同時に満たすレベンソン型位相シフトマスクを現実製造可能な構造として得ることができないからである。

- 5 このことから、第 1 領域 1 2 a を構成する材料としては、例えば T a N、R u および S i を用いる。また、第 2 領域 1 2 b を構成する材料としては、例えば M o および R u を用いる。これらの材料を用いるのは、例えば Jpn. J. Appl. Phys. Vol 40 (2001) pp6998-7001 の "Approach to patterning of extreme ultraviolet lithography masks" で
- 10 開示されているように、各材料のエッチング選択比を次に述べるように組み合わせにおいて非常に大きく取ることが公知だからである。すなわち、S i 下地に対する R u 層のエッチングを $\text{Cl}_2 + \text{O}_2$ ガスによるドライエッチングで行う場合、S i 下地は R u エッチングに対しエッチングストップパとして作用する。R u 下地に対する T a N 層のエッチングを
- 15 $\text{Ar} + \text{Cl}_2$ ガスによるドライエッチングで行う場合、R u 下地は T a N 層エッチングに対しエッチングストップパとして作用する。また、R u 下地に対する M o 層のエッチングおよび S i 層のエッチングも $\text{Ar} + \text{Cl}_2$ ガスによるドライエッチングで行い選択比を大きく取る。なぜならば、R u の塩化物 RuCl_3 は比較的安定な物質であり 600°C 以上で分解する。
- 20 一方、S i の塩化物 SiCl_4 の沸点は 57.6°C 、M o の塩化物 MoCl_5 の沸点は 268°C 、T a の塩化物 TaCl_5 の沸点は 242°C であり、R u の塩化物に対して真空中でエッチング反応ガスとして除去され易いためである。

- 第 1 6 図は、レベンソン型位相シフトマスクの構成例の断面構造を示す模式図である。図例の構造（以下「構造 1」という）は、第 1 5 図の
- 25 等位相線および第 4 図の等反射率線を基に設定された、判定基準 1 およ

び判定基準 2 を満たす構成である。第 1 領域 1 2 a では、反射多層膜基板 1 1 上に Ru 2 nm、Ta N 7 nm、Ru 4 nm の順に積層されて形成膜を構成している。第 1 領域 1 2 a のトータル膜厚は 11 nm、合成複素屈折率の実部は 0.9165 であり、虚部は 0.02507i である。また、第 2 領域 1 2 b では、Ru 4 nm、Mo 49 nm、Ru 2 nm の順に積層されて形成膜を構成している。第 2 領域 1 2 b のトータル膜厚は 55 nm、合成複素屈折率の実部は 0.9174 であり、虚部は 0.00764i である。なお、第 1 領域 1 2 a と第 2 領域 1 2 b との境界部分には、膜厚 120 nm の Ta N 吸収層が 40 nm 幅で形成されている。

このような構造 1 において、第 1 5 図の等位相線から第 1 領域 1 2 a と第 2 領域 1 2 b の段差を求めると、 90° と 270° の等位相線の関係から当該段差は 43 nm であり、同様に 180° と 0° の等位相線の関係から求めても 43 nm である。また、第 4 図の等透過率線によれば、第 1 領域 1 2 a の反射率は 0.39 であり、第 2 領域 1 2 b の反射率は 0.38 であることがわかる。そして、構造 1 について、詳細に膜内多重干渉効果も含めて第 2 領域 1 2 b の Mo 膜厚を変化させて位相差と反射率比を求めると、例えば第 1 7 図に示す結果が得られる。図例の結果から、第 1 6 図に示した構造 1 は、各材料の膜厚調整範囲内において最適構成であることが確認できる。

また、構造 1 において、反射率は、第 1 領域 1 2 a に対して 0.388 であり、第 2 領域 1 2 b に対して 0.387 であり、これらの間の反射率比は 0.258% となる。また、第 1 領域 1 2 a と第 2 領域 1 2 b の位相差は、TE (transverse electric) 波に対して 178.8° 、TM (transverse magnetic) 波に対して 178.7° となる。

このような構造 1 のレベンソン型位相シフトマスクを用いた場合の光強度分布は、構造 1 の 4 倍マスク上に膜厚 120 nm の Ta N 吸収層を

40nm 幅（ウエハ上単位では 10nm）で形成してウエハ上に露光した場合に、 $NA=0.25$ 、 $\sigma=0.70$ という光学条件であると、例えば第 18 図に示すような結果となる。

また、第 1 領域 12a と第 2 領域 12b の位相差が 180° であることは、40nm 幅の TAN 吸収層による 320nm ピッチ（ウエハ上単位では 10nm 幅で 80nm ピッチ）のパターンを用いて、以下に示す（8）式の位相差を求めることで確認できる。なお、（8）式では、ウエハ上における座標を用いている。x 軸の単位は nm である。

$$\varphi = I(x+80) - I(x) \quad (0 \leq x \leq 80) \quad \dots (8)$$

この（8）式を TEy 波、TMx 波および TMz 波に対してマスク直上において求めた結果を第 19 図に示す。図例によれば、TEy 波および TMx 波ともに、 180° の位相差を良好に保持している。一方、TMz 波は、 180° からのずれがより顕著ではあるが、転写に及ぼす寄与は 0.45% 程度であるため、ほとんど影響を与えない。

これらのことから、構造 1 のレベンソン型位相シフトマスクは、判定基準 1 および判定基準 2 を同時に満たしており、第 1 領域 12a と第 2 領域 12b とで反射率が略等しく、その位相差が 180° であると言える。

次いで、このように複素屈折率および膜厚が設定された第 1 領域 12a の形成膜および第 2 領域 12b の形成膜を、反射多層膜基板 11 上に成膜する場合の手順について簡単に説明する。第 20 図～第 23 図は、構造 1 の成膜手順の一例を示す説明図である。構造 1 による形成膜を成膜する場合には、第 20 図に示すように、先ず、反射多層膜基板 11 上に Ru 層をスパッタ法により成膜する（工程 1）。Ru 層は、通常、バイナリマスクでバッファ層として用いられる材料であるので、その通常

の場合と同じ製造装置を用いることができる。そして、Ru層上に、Ta₂N層をスパッタ法により成膜する（工程2）。Ta₂N層は、バイナリマスクで吸収層として用いられる材料であるので、その通常の場合と同じ製造装置を用いることができる。

- 5 その後は、Ta₂N層上にレジストを塗布し（工程3）、描画およびレジスト現像工程を経て、第2領域12bの部分のレジストを除去する（工程4）。レジスト除去後は、第2領域12bの部分のTa₂N層をAr+Cl₂ガスによるドライエッチングによって除去する（工程5）。このTa₂N層の下のRu層はエッチングストップ層として機能することになる。そして、レジストを剥離し（工程6）、再びRu層をスパッタ成膜した後に（工程7）、今度はMo層をスパッタ成膜する（工程8）。Mo層は、反射多層膜基板11の構成材料であるので、多層膜用製造装置を用いることができる。
- 10

- Mo層を成膜すると、続いて、第21図に示すように、レジストを塗布した後に（工程9）、描画およびレジスト現像工程を経て、第1領域12aの部分のレジストを除去する（工程10）。そして、第1領域12aの部分のMo層をAr+Cl₂ガスによるドライエッチングにより除去する（工程11）。このMo層の下のRu層はエッチングストップ層として機能することになる。その後は、レジストを剥離し（工程12）、
- 20 再びRu層をスパッタ成膜する（工程13）。

Ru層を成膜した後は、次いで、第22図に示すように、Ta₂N吸収層をスパッタ成膜し（工程14）、さらにレジストを塗布する（工程15）。そして、描画およびレジスト現像工程を経て、吸収層として残す部分以外のレジストを除去する（工程16）。

- 25 その後、第23図に示すように、Ta₂N吸収層をAr+Cl₂ガスによるドライエッチングにより除去する（工程17）。このTa₂N吸収層の下

のRu層はエッチングストッパ層として機能することになる。そして、レジストを剥離すれば（工程18）、Ru層をエッチングストッパ層として有効に用いつつ、構造1のレベンソン型位相シフトマスクを構成することができる。

- 5 第24図は、レベンソン型位相シフトマスクの他の構成例の断面構造を示す模式図である。図例の構造（以下「構造2」という）も、上述した構造1と同様に、第15図の等位相線および第4図の等反射率線を基に設定された、判定基準1および判定基準2を満たす構成である。第1領域12aでは、反射多層膜基板11上にRu3nm、Ta₂N₅nm、Ru7nmの順に積層されて形成膜を構成している。第1領域12aのトータル膜厚は15nm、合成複素屈折率の実部は0.9054であり、虚部は0.02217iである。また、第2領域12bでは、Ru3nm、Mo49nm、Ru4nmの順に積層されて形成膜を構成している。第2領域12bのトータル膜厚は56nm、合成複素屈折率の実部は0.9169であり、虚部は0.00782iである。

- このような構造2において、第15図の等位相線から第1領域12aと第2領域12bの段差を求めると、90°と270°の等位相線の関係から当該段差は44nmであり、同様に180°と0°の等位相線の関係から求めても44nmである。また、第4図の等透過率線によれば、第1領域12aの反射率は0.38であり、第2領域12bの反射率は0.36であることがわかる。そして、構造2について、詳細に膜内多重干渉効果も含めて第2領域12bのMo膜厚を変化させて位相差と反射率比を求めると、例えば第25図に示す結果が得られる。図例の結果から、第24図に示した構造2は、各材料の膜厚調整範囲内において最適構成であることが確認できる。

また、構造 2 において、反射率は、第 1 領域 1 2 a に対して 0.399 であり、第 2 領域 1 2 b に対して 0.396 であり、これらの間の反射率比は 0.710% となる。したがって、第 1 領域 1 2 a と第 2 領域 1 2 b の位相差は、TE 波に対して 178.2° 、TM 波に対して 178.3° となる。

- 5 このような構造 2 のレベンソン型位相シフトマスクを用いた場合の光強度分布は、構造 2 の 4 倍マスク上に膜厚 120nm の TaN 吸収層を 40nm 幅（ウエハ上単位では 10nm）で形成してウエハ上に露光した場合に、 $NA=0.25$ 、 $\sigma=0.70$ という光学条件であると、例えば第 26 図に示すような結果となる。
- 10 また、第 1 領域 1 2 a と第 2 領域 1 2 b の位相差が 180° であることは、40nm 幅の TaN 吸収層による 320nm ピッチ（ウエハ上単位では 10nm 幅で 80nm ピッチ）のパターンを用いて、上述した（8）式の位相差を求めることで確認できる。この（8）式を TE_y 波、TM_x 波および TM_z 波に対してマスク直上において求めた結果を第 27 図に示す。
- 15 図例によれば、TE_y 波および TM_x 波ともに、 180° の位相差を良好に保持している。一方、TM_z 波は、 180° からのずれがより顕著ではあるが、転写に及ぼす寄与は 0.45% 程度であるため、ほとんど影響を与えない。

- 20 このように複素屈折率および膜厚が設定された構造 2 の成膜手順については、上述した構造 1 の場合と略同様である。構造 1 の場合とは、工程 5 と工程 6 との間に、第 2 領域 1 2 b の部分の Ru 層を Cl_2+O_2 ガスによるドライエッチングにより除去する工程が追加される点で異なる。

- 25 第 28 図は、レベンソン型位相シフトマスクのさらに他の構成例の断面構造を示す模式図である。図例の構造（以下「構造 3」という）も、上述した構造 1 および構造 2 と同様に、第 13 図の等位相線および第 4 図の等反射率線を基に設定された、判定基準 1 および判定基準 2 を満た

す構成である。第 1 領域 1 2 a では、反射多層膜基板 1 1 上に R u 5 nm、T a N 20 nm、S i 8 nm、R u 5 nm の順に積層されて形成膜を構成している。また、第 2 領域 1 2 b では、R u 5 nm、S i 8 nm、R u 43.5 nm の順に積層されて形成膜を構成している。

- 5 この構造 3 では、構造 1 または構造 2 の場合とは異なり、第 1 領域 1 2 a および第 2 領域 1 2 b の形成膜の構成材料に S i を用いている。ここで、S i の複素屈折率は、 $0.99932 - 0.00182645i$ であり、複素屈折率の実部は真空中の屈折率である 1 に極めて近く、また複素屈折率の虚部は他材料と比較して小さい。そのため、S i 材料は、膜内多重干渉効果の利用により、位相差および反射率比を調整する役割を担うことになる。

- したがって、第 1 5 図の等位相線および第 4 図の等反射率線から判定基準 1 および判定基準 2 を満たす構成を得る場合には、S i 層を考慮せずに、位相差を重点的に合わせ込む条件を抽出し、その後に S i 層の膜内多重干渉により反射率を合わせ込むとともに、位相差を 180° 近くに調整する手順を採る、といったことが可能となる。すなわち、判定基準 1 および判定基準 2 を満たす構成は、第 1 領域 1 2 a に対しては反射多層膜基板 1 1 上に R u 5 nm、T a N 20 nm、R u 5 nm の順に積層したものと考え、第 2 領域 1 2 b に対しては R u 5 nm、R u 43.5 nm の順に積層したものとする。この場合の第 1 領域 1 2 a のトータル膜厚は 30 nm、合成複素屈折率の実部は 0.9234 であり、虚部は $0.02687i$ である。第 2 領域 1 2 b のトータル膜厚は 48.5 nm、合成複素屈折率の実部は 0.8875 であり、虚部は $0.01747i$ である。

- このような構造 3 において、第 1 5 図の等位相線から第 1 領域 1 2 a と第 2 領域 1 2 b の段差を求めると、 90° と 270° の等位相線の関係から当該段差は 22 nm であり、同様に 180° と 0° の等位相線の関係から

求めると 16nm である。また、第 4 図の等透過率線によれば、第 1 領域 1 2 a の反射率は 0.14 であり、第 2 領域 1 2 b の反射率は 0.18 であることがわかる。そして、構造 3 について、詳細に膜内多重干渉効果も含めて第 2 領域 1 2 b の Mo 膜厚を変化させて位相差と反射率比を求めると、例えば第 2 9 図に示す結果が得られる。図例の結果から、第 2 8 図に示した構造 3 は、各材料の膜厚調整範囲内において最適構成であることが確認できる。この構造 3 では、第 1 領域 1 2 a および第 2 領域 1 2 b の形成膜の構成材料に Si を用いており、その Si 層による膜内多重干渉を効果的に利用していることから、位相差と反射率比が基準値を満たすことになる条件を実現することができるのである。

また、構造 3 において、反射率は、第 1 領域 1 2 a に対して 0.195 であり、第 2 領域 1 2 b に対して 0.200 であり、これらの間の反射率比は 2.41% となる。したがって、第 1 領域 1 2 a と第 2 領域 1 2 b の位相差は、TE 波に対して 185.3° 、TM 波に対して 185.1° となる。

このような構造 3 のレベンソン型位相シフトマスクを用いた場合の光強度分布は、構造 3 の 4 倍マスク上に膜厚 120nm の TaN 吸収層を 40nm 幅（ウエハ上単位では 10nm）で形成してウエハ上に露光した場合に、 $NA=0.25$ 、 $\sigma=0.70$ という光学条件であると、例えば第 3 0 図に示すような結果となる。

また、第 1 領域 1 2 a と第 2 領域 1 2 b の位相差が 180° であることは、40nm 幅の TaN 吸収層による 320nm ピッチ（ウエハ上単位では 10nm 幅で 80nm ピッチ）のパターンを用いて、上述した（8）式の位相差を求めることで確認できる。この（8）式を TE_y 波、TM_x 波および TM_z 波に対してマスク直上において求めた結果を第 3 1 図に示す。図例によれば、TE_y 波および TM_x 波ともに、 180° の位相差を良好に保持している。一方、TM_z 波は、 180° からのずれがより顕著では

あるが、転写に及ぼす寄与は 0.45% 程度であるため、ほとんど影響を与えない。

このように複素屈折率および膜厚が設定された構造 3 の成膜手順についても、上述した構造 2 の場合と略同様である。構造 2 の場合とは、工程 8 にて、Mo 層に代わって Si 層および Ru 層をスパッタ成膜する点で異なる。

ところで、構造 1 ~ 3 では、いずれも、第 1 領域 1 2 a の形成膜と第 2 領域 1 2 b の形成膜とに膜厚差があり、それぞれの間に段差が生じている。このような構成であっても、上述したように位相シフトの効果を
10 得ることが可能である。ただし、第 1 領域 1 2 a と第 2 領域 1 2 b との境界部分に TaN 吸収層を形成することを考慮すると、その加工の容易さの点で、第 1 領域 1 2 a と第 2 領域 1 2 b との間に段差がなく、平坦に形成されているほうが望ましい。そこで、以下に、第 1 領域 1 2 a と第 2 領域 1 2 b とが平坦である構成の具体例について説明する。

15 第 3 2 図は、レベンソン型位相シフトマスクの平坦な構成例の断面構造を示す模式図である。図例の構造（以下「構造 4」という）は、第 1 5 図の等位相線および第 4 図の等反射率線を基に設定された、判定基準 1 および判定基準 2 を満たす構成である。第 1 領域 1 2 a では、反射多層膜基板 1 1 上に Ru 3 nm、TaN 7 nm、Ru 6 nm、Si 37 nm、Ru
20 5 nm の順に積層されて形成膜を構成している。また、第 2 領域 1 2 b では、Ru 3 nm、Mo 47 nm、Ru 8 nm の順に積層されて形成膜を構成している。

この構造 4 において、第 1 領域 1 2 a の形成膜の構成材料に Si を用いているのは、構造 3 の場合と同様に、膜内多重干渉効果の利用により
25 位相差および反射率比を調整する役割を担わせるためである。したがって、第 1 5 図の等位相線および第 4 図の等反射率線から判定基準 1 およ

び判定基準 2 を満たす構成を得る場合には、S i 層を考慮せずに、位相差を重点的に合わせ込む条件を抽出し、その後に S i 層の膜内多重干渉により反射率を合わせ込むとともに、位相差を 180° 近くに調整する手順を採る、といったことが可能となる。すなわち、判定基準 1 および判定基準 2 を満たす構成は、第 1 領域 1 2 a に対しては反射多層膜基板 1 1 上に R u 3 nm、T a N 7 nm、R u 6 nm、R u 5 nm の順に積層したものと考え、第 2 領域 1 2 b に対しては R u 3 nm、M o 47 nm、R u 8 nm の順に積層したものとする。この場合の第 1 領域 1 2 a のトータル膜厚は 21 nm、合成複素屈折率の実部は 0.9054 であり、虚部は $0.03631i$ である。第 2 領域 1 2 b のトータル膜厚は 58 nm、合成複素屈折率の実部は 0.9147 であり、虚部は $0.000904i$ である。

このような構造 4 において、第 1 5 図の等位相線から第 1 領域 1 2 a と第 2 領域 1 2 b の段差を求めると、 90° と 270° の等位相線の関係から当該段差は 40 nm であり、同様に 180° と 0° の等位相線の関係から求めると 43 nm である。また、第 4 図の等透過率線によれば、第 1 領域 1 2 a の反射率は 0.15 であり、第 2 領域 1 2 b の反射率は 0.30 であることがわかる。

このように、構造 4 では、S i 層を考慮しないと、構造 1 および構造 2 に類似しているものの、第 1 領域 1 2 a と第 2 領域 1 2 b とで反射率が一致しない。これを解消するために、構造 4 では、S i 層を挿入し、膜内多重干渉を効果的に利用することで、第 1 領域 1 2 a と第 2 領域 1 2 b における反射率を一致させているのである。

そのために、構造 4 においては、第 1 領域 1 2 a の T a N 層の膜厚、第 2 領域 1 2 b の M o 層の膜厚、および第 1 領域 1 2 a の S i 層の膜厚を適宜変化させ、判定基準 1 および判定基準 2 を満たす構成を求める。第 3 3 図は、T a N 層の膜厚および S i 層の膜厚を一定とし M o 層の膜

厚をパラメータとして位相差および反射率比を求めた結果である。図例の結果から、第 3 2 図に示した構造 4 は、第 1 領域 1 2 a と第 2 領域 1 2 b の膜厚差が 0 nm となる条件で判定基準を満たす構成であることが確認できる。この構造 4 では、第 1 領域 1 2 a の形成膜の構成材料に S i を用いており、その S i 層による膜内多重干渉を効果的に利用していることから、位相差と反射率比が基準値を満たし、かつ、第 1 領域 1 2 a と第 2 領域 1 2 b とが平坦になる構成を実現することができるのである。

また、構造 4 において、反射率は、第 1 領域 1 2 a に対して 0.285 であり、第 2 領域 1 2 b に対して 0.287 であり、これらの間の反射率比は 0.65% となる。したがって、第 1 領域 1 2 a と第 2 領域 1 2 b の位相差は、T E 波に対して 180.8° 、T M 波に対して 180.5° となる。

このような構造 4 のレベンソン型位相シフトマスクを用いた場合の光強度分布は、構造 4 の 4 倍マスク上に膜厚 120nm の T a N 吸収層を 40nm 幅（ウエハ上単位では 10nm）で形成してウエハ上に露光した場合に、 $NA=0.25$ 、 $\sigma=0.70$ という光学条件であると、例えば第 3 4 図に示すような結果となる。

また、第 1 領域 1 2 a と第 2 領域 1 2 b の位相差が 180° であることは、40nm 幅の T a N 吸収層による 320nm ピッチ（ウエハ上単位では 10nm 幅で 80nm ピッチ）のパターンを用いて、上述した（8）式の位相差を求めることで確認できる。この（8）式を T E y 波、T M x 波および T M z 波に対してマスク直上において求めた結果を第 3 5 図に示す。図例によれば、T E y 波および T M x 波ともに、 180° の位相差を良好に保持している。一方、T M z 波は、 180° からのずれがより顕著ではあるが、転写に及ぼす寄与は 0.45% 程度であるため、ほとんど影響を与えない。

このように複素屈折率および膜厚が設定された構造 4 の成膜手順については、上述した構造 1 の場合（第 20 図～第 23 図参照）に加えて、構造 2 の場合と同様に工程 5 と工程 6 との間にて第 2 領域 12b の部分の Ru 層を $\text{Cl}_2 + \text{O}_2$ ガスによるドライエッチングにより除去する工程を行うとともに、工程 13 と工程 14 との間にて第 36 図、第 37 図に示すような工程を行えばよい。

すなわち、第 36 図に示すように、工程 13 にて Ru 層を成膜した後は、次いで、Si 層をスパッタ成膜し（工程 13-1）、さらにレジストを塗布する（工程 13-2）。そして、描画およびレジスト現像工程を経て、第 2 領域 12b の部分のレジストを除去する（工程 13-3）。

その後、第 37 図に示すように、第 2 領域 12b の部分の Si 膜を $\text{Ar} + \text{Cl}_2$ ガスによるドライエッチングにより除去する（工程 13-4）。この Si 層の下層の Ru 層はエッチングストップ層として機能することになる。そして、レジストを剥離して（工程 13-5）、Ru 層をスパッタ成膜した後は（工程 13-6）、Ta-N 吸収層をスパッタ成膜し（工程 14）、それ以降、構造 1 の場合と同様の処理を行う。このような成膜手順によって、構造 4 のレベンソン型位相シフトマスクを構成することができる。

以上のように、構造 4 については、第 1 領域 12a の Ta-N 層の膜厚、第 2 領域 12b の Mo 層の膜厚、および第 1 領域 12a の Si 層の膜厚を適宜変化させ、判定基準 1 および判定基準 2 を満たし、かつ、第 1 領域 12a と第 2 領域 12b とが平坦である構成を特定している。ただし、このような構成は、以下に述べるような構造においても得ることができる。

第 38 図は、レベンソン型位相シフトマスクの他の平坦な構成例の断面構造を示す模式図である。図例の構造（以下「構造 5」という）も、

T a N 層の膜厚および S i 層の膜厚を一定にして M o 層の膜厚をパラメータとして位相差および反射率比を求めた結果である。第 39 図は、T a N 層の膜厚および S i 層の膜厚を一定とし M o 層の膜厚をパラメータとして位相差および反射率比を求めた結果である。図例の結果から、構造 5 についても、第 1 領域 1 2 a と第 2 領域 1 2 b の膜厚差が 0 nm となる条件で判定基準を満たす構成であることが確認できる。この構造 5 において、反射率は、第 1 領域 1 2 a に対して 0.288 であり、第 2 領域 1 2 b に対して 0.287 であり、これらの間の反射率比は 0.36% である。また、第 1 領域 1 2 a と第 2 領域 1 2 b の位相差は、T E 波に対して 181.4° 、T M 波に対して 181.1° である。

このような構造 5 のレベンソン型位相シフトマスクを用いた場合の光強度分布は、構造 5 の 4 倍マスク上に膜厚 120 nm の T a N 吸収層を 40 nm 幅（ウエハ上単位では 10 nm）で形成してウエハ上に露光した場合に、 $NA=0.25$ 、 $\sigma=0.70$ という光学条件であると、例えば第 40 図に示すような結果となる。

また、第 1 領域 1 2 a と第 2 領域 1 2 b の位相差が 180° であることは、40 nm 幅の T a N 吸収層による 320 nm ピッチ（ウエハ上単位では 10 nm 幅で 80 nm ピッチ）のパターンを用いて、上述した（8）式の位相差を求めることで確認できる。この（8）式を T E y 波、T M x 波および T M z 波に対してマスク直上において求めた結果を第 41 図に示す。図例によれば、T E y 波および T M x 波ともに、 180° の位相差を良好に保持している。一方、T M z 波は、 180° からのずれがより顕著ではあるが、転写に及ぼす寄与は 0.45% 程度であるため、ほとんど影響を与えない。

このような構造 5 の成膜手順については、上述した構造 4 の場合と同様である。

第42図は、レベンソン型位相シフトマスクのさらに他の平坦な構成例の断面構造を示す模式図である。図例の構造（以下「構造6」という）も、TaN層の膜厚およびSi層の膜厚を一定にしてMo層の膜厚をパラメータとして位相差および反射率比を求めた結果である。第43図は、TaN層の膜厚およびSi層の膜厚を一定としMo層の膜厚をパラメータとして位相差および反射率比を求めた結果である。図例の結果から、構造6についても、第1領域12aと第2領域12bの膜厚差が0nmとなる条件で判定基準を満たす構成であることが確認できる。この構造6において、反射率は、第1領域12aに対して0.300であり、第2領域12bに対して0.287であり、これらの間の反射率比は0.90%である。また、第1領域12aと第2領域12bの位相差は、TE波に対して 180.6° 、TM波に対して 180.3° である。

このような構造6のレベンソン型位相シフトマスクを用いた場合の光強度分布は、構造6の4倍マスク上に膜厚120nmのTaN吸収層を40nm幅（ウエハ上単位では10nm）で形成してウエハ上に露光した場合に、 $NA=0.25$ 、 $\sigma=0.70$ という光学条件であると、例えば第44図に示すような結果となる。

また、第1領域12aと第2領域12bの位相差が 180° であることは、40nm幅のTaN吸収層による320nmピッチ（ウエハ上単位では10nm幅で80nmピッチ）のパターンを用いて、上述した（8）式の位相差を求めることで確認できる。この（8）式をTE_y波、TM_x波およびTM_z波に対してマスク直上において求めた結果を第45図に示す。図例によれば、TE_y波およびTM_x波ともに、 180° の位相差を良好に保持している。一方、TM_z波は、 180° からのずれがより顕著ではあるが、転写に及ぼす寄与は0.45%程度であるため、ほとんど影響を与えない。

このような構造 6 の成膜手順についても、上述した構造 4 または構造 5 の場合と同様である。

次に、以上のようなレベンソン型位相シフトマスクにおける効果を、従来の位相シフト効果を用いないバイナリマスクとの比較において説明する。第 46 図は、上述した構造 5 のレベンソン型位相シフトマスクについて、構造 5 の 4 倍マスク上に膜厚 120nm の TaN 吸収層を 40nm 幅、30nm 幅、20nm 幅、10nm 幅、0nm 幅（ウエハ上単位では 10nm、7.5nm、5nm、2.5nm、0nm）で形成してウエハ上に露光した場合に、 $NA=0.25$ 、 $\sigma=0.70$ という光学条件で得られた光強度分布を示す説明図である。図例によれば、いずれの TaN 吸収層幅においても、良好なパターンコントラストが得られることがわかる。

これに対して、第 47 図は、従来のバイナリマスクについて、そのマスク上に膜厚 120nm の TaN 吸収層を 40nm 幅、30nm 幅、20nm 幅、10nm 幅（ウエハ上単位では 10nm、7.5nm、5nm、2.5nm）で形成してウエハ上に露光した場合に、 $NA=0.25$ 、 $\sigma=0.70$ という光学条件で得られた光強度分布を示す説明図である。図例によれば、TaN 吸収層幅が小さくなるに伴って、パターンコントラストが著しく低下することがわかる。

これらのことから、上述した構造のレベンソン型位相シフトマスクを用いた場合には、TaN 吸収層 10nm 幅（ウエハ上単位では 2.5nm）においてウエハ上で 15nm またはこれ以下のサイズの線幅の転写を行うことが可能となる、といった顕著な効果が得られると言える。さらには、例えば第 48 図に示すように、 $NA=0.30$ の光学条件で露光すれば、TaN 吸収層 10nm 幅（ウエハ上単位では 2.5nm）においてウエハ上で 10nm またはこれ以下のサイズの線幅の転写を行うことが可能になる、といった顕著な効果も得られるようになる。

以上のように、本実施形態（第 1 および第 2 の実施の形態）にて説明した位相シフトマスクでは、第 1 領域 1 2 a および第 2 領域 1 2 b の形成膜の膜厚および複素屈折率が、それぞれでの極短紫外光の反射光に所定の位相差が生じるように設定されている。さらに詳しくは、位相シフトマスクを構成するのにあたり、先ず、反射多層膜基板 1 1 上の形成膜（特に、その構成材料における複素屈折率）に依存することなく、任意の複素屈折率および膜厚について当該複素屈折率および当該膜厚から得られる反射光の位相および反射率を特定し、その特定した位相および反射率に基づいて、第 1 領域 1 2 a と第 2 領域 1 2 b で 180° の位相差が生じるように、それぞれにおける形成膜の膜厚および複素屈折率が選定されている。

したがって、本実施形態で説明した位相シフトマスクによれば、極短紫外光に対応する反射型マスクの場合であっても、超解像技術を用いるための位相シフトマスクを構成することが実現可能となる。すなわち、本実施形態で説明した位相シフトマスクの製造方法を用いれば、極短紫外光の位相シフトマスクを構成することができる。

本実施形態では露光光として極短紫外光を使用した場合を例にとり、説明してきたが、露光光は極短紫外光に限らず、X線、放射線、紫外線、又は、可視光であってもよい。これらの露光光によっても、反射型マスクの超解像技術を用いるための位相シフトマスクを構成することが実現可能となる。すなわち、本実施形態で説明した位相シフトマスクの製造方法を用いれば、極短紫外光の位相シフトマスクを構成することができる。

しかも、本実施形態で説明した位相シフトマスクでは、単に極短紫外光を用いるだけではなく、超解像技術をも利用することで、ウエハ上のパターンコントラストを著しく増大させ、従来のバイナリマスクでは得

られなかった解像性を得ることができる。つまり、本実施形態の位相シフトマスクを用いて半導体装置を製造すれば、従来のバイナリマスクを用いた場合よりもより微細なホールパターン、スペースパターンおよびラインパターンを得ることができ、パターンの極小化への対応に非常に好適となる。

また、本実施形態で説明した位相シフトマスクでは、膜内多重干渉を効果的に利用することで、第1領域12aと第2領域12bとで形成膜の膜厚を略等しくして、これら第1領域12aと第2領域12bとが平坦になる構成を実現している。したがって、例えばレベンソン型位相シフトマスクにおいて第1領域12aと第2領域12bとの境界部分にTaN吸収層を形成する場合であっても、平坦部分にその形成を行えばよい

10 ため、加工が非常に容易なものとなり、またその形成精度の確保も容易となる。

また、本実施形態で説明した位相シフトマスクでは、第1領域12aの形成膜および第2領域12bの形成膜の両方またはいずれか一方が、複数の材料からなる積層構造を有している。したがって、任意の複素屈折率および膜厚について当該複素屈折率および当該膜厚から得られる反射光の位相および反射率を特定しても、その任意の複素屈折率および膜厚に対応する形成膜を得ることが可能となる。つまり、複数の材料からなる積層構造を用いることによって、所望する位相シフトマスクを構成することが可能となるのである。

15 20

以上に説明したように、本発明に係る露光光の位相シフトマスクおよびその製造方法によれば、適切な屈折率と吸収係数の組み合わせを得ることで、露光光に対応する反射型マスクの場合であっても、超解像技術を用いるための位相シフトマスクを構成することが実現可能となる。ま

25

た、本発明に係る半導体装置の製造方法によれば、パターンの極小化への対応に非常に好適となる。

- 特に露光光に極短紫外光を用いた場合に必要となる反射型マスクの超解像技術を用いるための位相シフトマスクを構成することが実現可能となる。すなわち、本実施形態で説明した位相シフトマスクの製造方法を用いれば、極短紫外光の位相シフトマスクを構成することができる。
- 5

請求の範囲

1. 露光光を反射して被露光体上に所望パターンを転写するために用いられる露光光の位相シフトマスクであって、

5 露光光を反射する反射多層膜基板と、当該反射多層膜基板上に形成された第1領域および第2領域とを具備するとともに、

前記第1領域の形成膜および前記第2領域の形成膜における各膜厚および各複素屈折率が、前記第1領域での露光光の反射光と前記第2領域での露光光の反射光とで所定の位相差が生じるように設定されている

10 ことを特徴とする露光光の位相シフトマスク。

2. 前記露光光は極短紫外光、X線、放射線、紫外線、又は、可視光であることを特徴とする請求の範囲第1項記載の露光光の位相シフトマスク。

3. 前記所定の位相差に加えて、前記第1領域での露光光の反射率と
15 前記第2領域での露光光の反射率とが略等しくなるように、前記第1領域の形成膜および前記第2領域の形成膜における各膜厚および各複素屈折率が設定されていることを特徴とする請求の範囲第1項記載の露光光の位相シフトマスク。

4. 前記第1領域の形成膜および前記第2領域の形成膜の膜厚が互いに略等しくなるように構成されていることを特徴とする請求の範囲第1
20 項記載の露光光の位相シフトマスク。

5. 前記第1領域の形成膜および前記第2領域の形成膜の両方またはいずれか一方は、複数の材料からなる積層構造を有していることを特徴とする請求の範囲第1項記載の露光光の位相シフトマスク。

6. 前記第1領域の形成膜および前記第2領域の形成膜における各膜厚および各複素屈折率は、等位相線及び等反射率線を用いて設定されたことを特徴とする請求の範囲第3項記載の露光光の位相シフトマスク。

7. 前記等位相線は、前記複素屈折率の虚部を固定して求めることを
5 特徴とする請求の範囲第6項記載の露光光の位相シフトマスク。

8. 前記位相シフトマスクは、ハーフトーン型位相シフトマスク、又は、レベンソン型位相シフトマスクであることを特徴とする請求の範囲第1項記載の露光光の位相シフトマスク。

9. 露光光を反射する反射多層膜基板と、当該反射多層膜基板上に形成された第1領域および第2領域とを具備してなる露光光の位相シフト
10 マスクの製造方法であって、

前記露光光に対する任意の複素屈折率と、前記反射多層膜基板上に形成する膜の任意の膜厚とについて、当該複素屈折率および当該膜厚から得られる前記露光光の反射光の位相および反射率を特定し、

15 特定した位相および反射率に基づいて、前記第1領域での露光光の反射光と前記第2領域での露光光の反射光とで所定の位相差が生じるように、前記第1領域の形成膜および前記第2領域の形成膜における各膜厚および各複素屈折率を選定する

ことを特徴とする露光光の位相シフトマスクの製造方法。

20 10. 前記露光光は極短紫外光、X線、放射線、紫外線、又は、可視光であることを特徴とする請求の範囲第9項記載の露光光の位相シフトマスク。

11. 前記第1領域の形成膜および前記第2領域の形成膜の各膜厚の選定にあたり、膜内多重干渉に起因する位相差および反射率の膜厚に対する変動を考慮することを特徴とする請求の範囲第9項記載の露光光の
25 位相シフトマスクの製造方法。

1 2. 選定した複素屈折率および膜厚を、複数の材料からなる積層構造によって実現される合成複素屈折率および合計膜厚によって得ることを特徴とする請求の範囲第 9 項記載の露光光の位相シフトマスクの製造方法。

- 5 1 3. 前記第 1 領域の形成膜および前記第 2 領域の形成膜における各膜厚および各複素屈折率は、等位相線及び等反射率線を用いて設定されたことを特徴とする請求の範囲第 9 項記載の露光光の位相シフトマスクの製造方法。

- 10 1 4. 前記等位相線は、前記複素屈折率の虚部を固定して求めることを特徴とする請求の範囲第 1 3 項記載の露光光の位相シフトマスクの製造方法。

1 5. 前記位相シフトマスクは、ハーフトーン型位相シフトマスク、又は、レベンソン型位相シフトマスクであることを特徴とする請求の範囲第 9 項記載の露光光の位相シフトマスクの製造方法。

- 15 1 6. 露光光の位相シフトマスクを用いて被露光体上に所望パターンを転写するリソグラフィ工程を含む半導体装置の製造方法であって、

前記露光光に対する任意の複素屈折率と、前記反射多層膜基板上に形成する膜の任意の膜厚とについて、当該複素屈折率および当該膜厚から得られる前記露光光の反射光の位相および反射率を特定し、

- 20 特定した位相および反射率に基づいて、前記反射多層膜基板上の第 1 領域での露光光の反射光と前記反射多層膜基板上の第 2 領域での露光光の反射光とで所定の位相差が生じるように、前記第 1 領域の形成膜および前記第 2 領域の形成膜における各膜厚および各複素屈折率を選定し、

- 25 選定した複素屈折率および膜厚にて前記第 1 領域の形成膜および前記第 2 領域の形成膜をそれぞれ前記反射多層膜基板上に形成して、前記反

射多層膜基板上に前記第 1 領域および前記第 2 領域を具備してなる露光光の位相シフトマスクを構成し、

構成した露光光の位相シフトマスクを用いて被露光体上に所望パターンを転写する

5 ことを特徴とする半導体装置の製造方法。

17. 前記露光光は極短紫外光、X線、放射線、紫外線、又は、可視光であることを特徴とする請求の範囲第 16 項記載の半導体装置の製造方法。

10 18. 前記第 1 領域の形成膜および前記第 2 領域の形成膜における各膜厚および各複素屈折率は、等位相線及び等反射率線を用いて設定されたことを特徴とする請求の範囲第 18 項記載の半導体装置の製造方法。

19. 前記等位相線は、前記複素屈折率の虚部を固定して求めることを特徴とする請求の範囲第 18 項記載の半導体装置の製造方法。

15 20. 前記位相シフトマスクは、ハーフトーン型位相シフトマスク、又は、レベンソン型位相シフトマスクであることを特徴とする請求の範囲第 16 項記載の半導体装置の製造方法。

1/48

Fig.1A

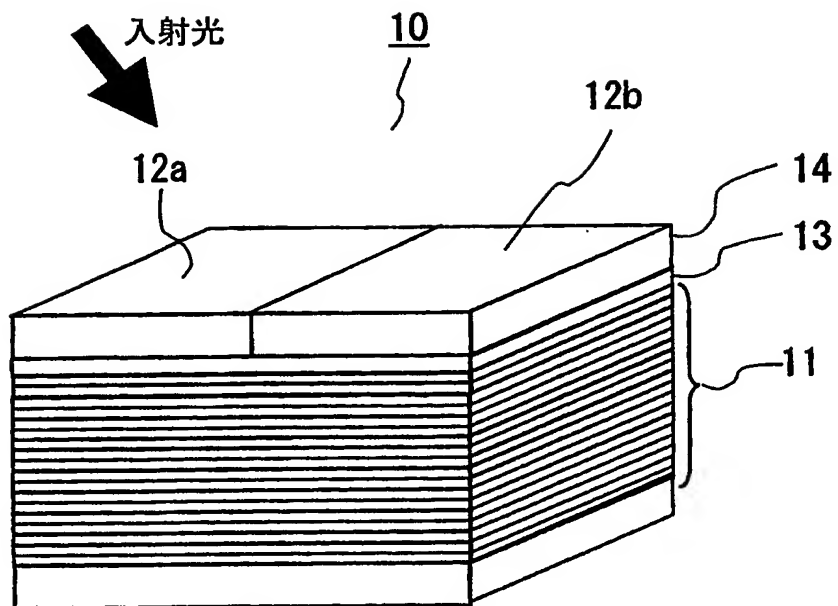
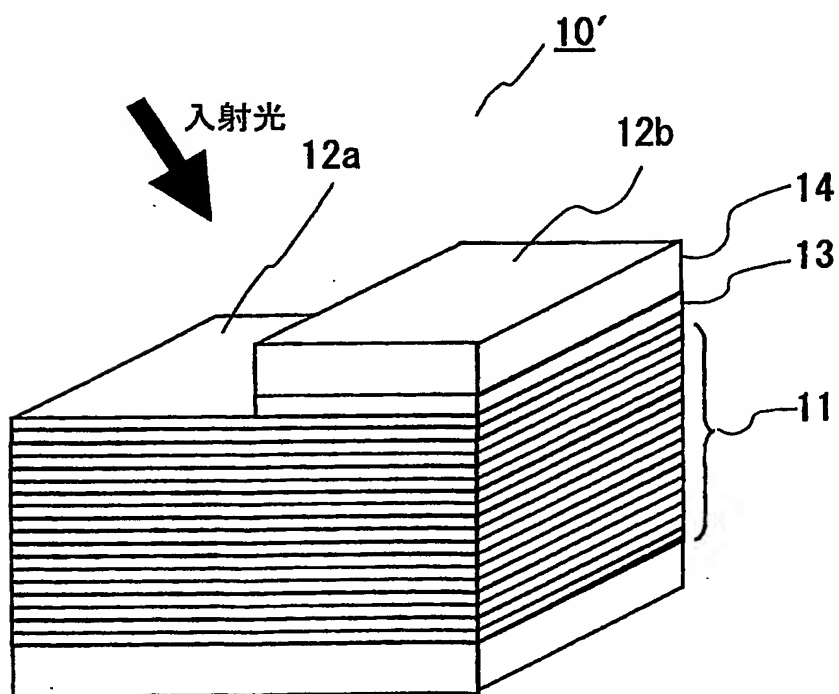


Fig.1B



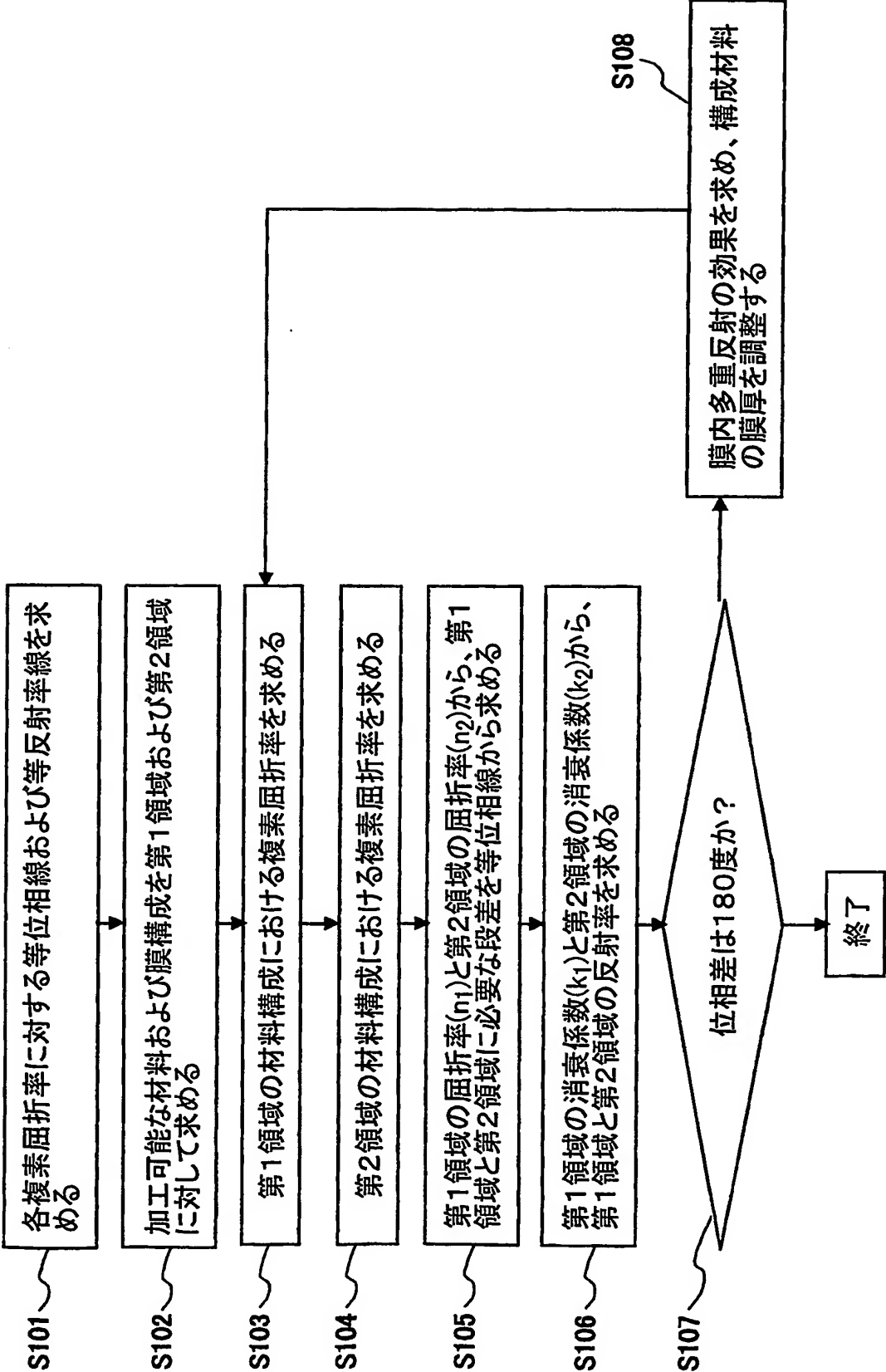


Fig.2

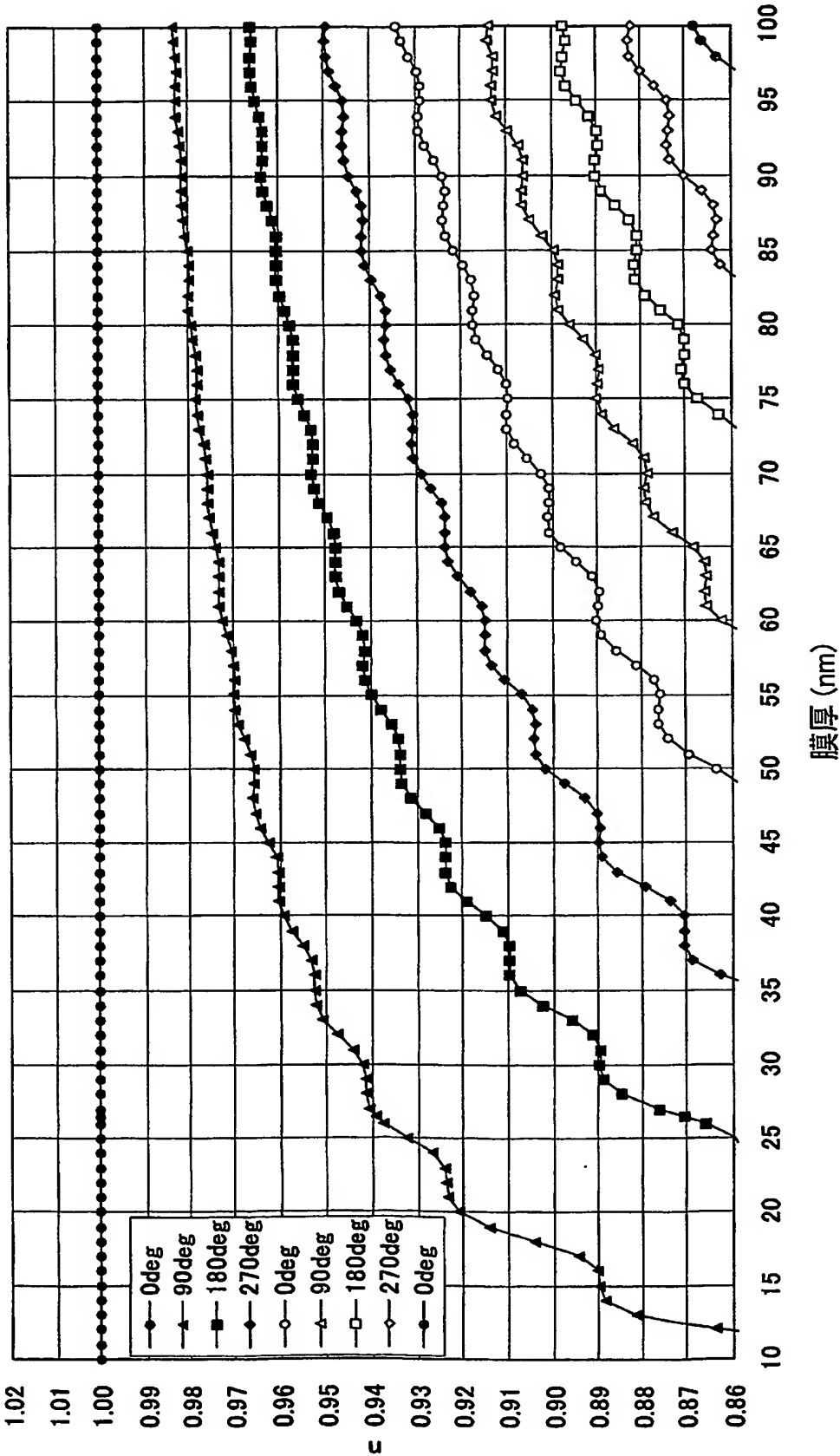


Fig.3

4/48

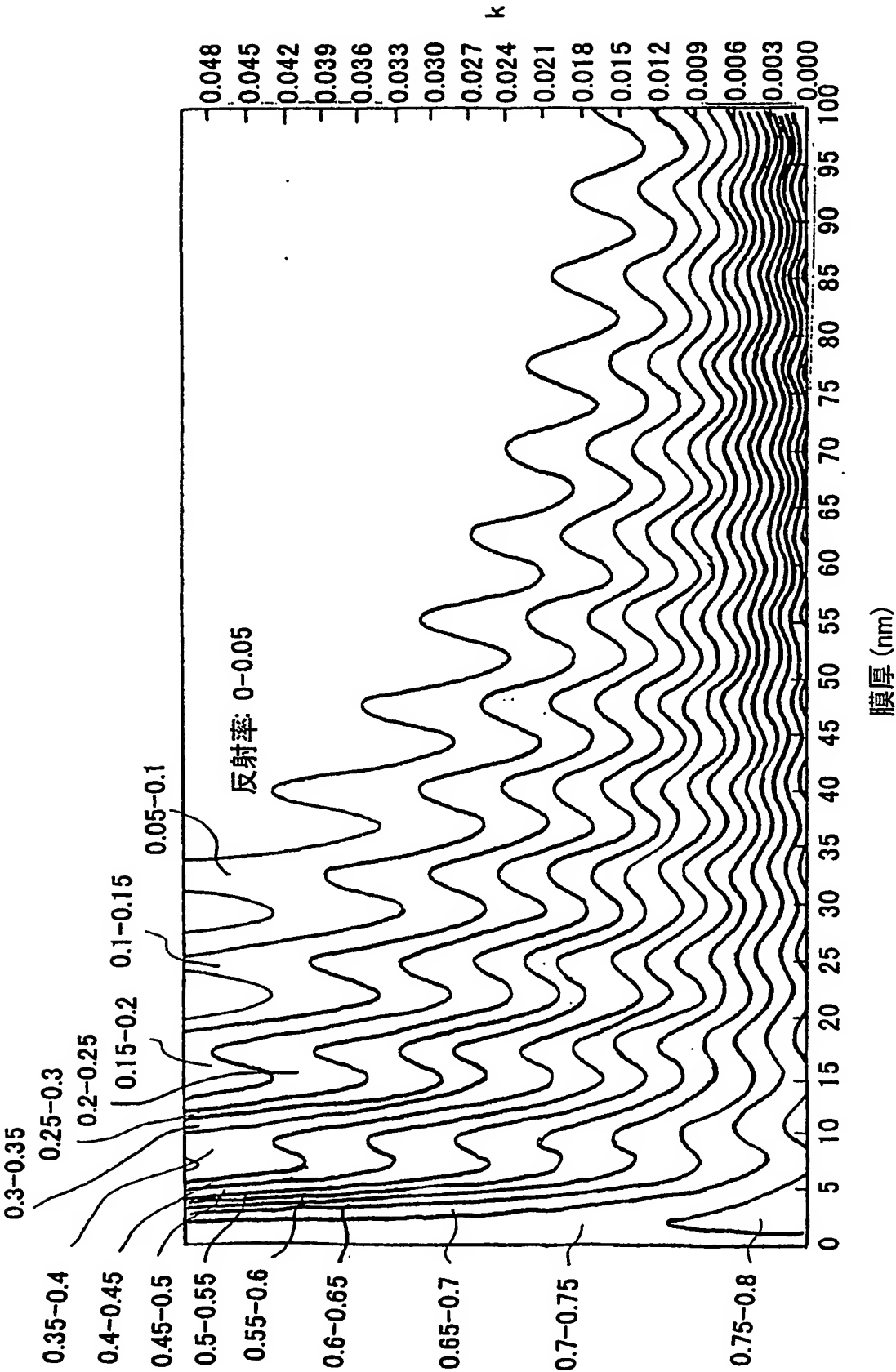


Fig.4

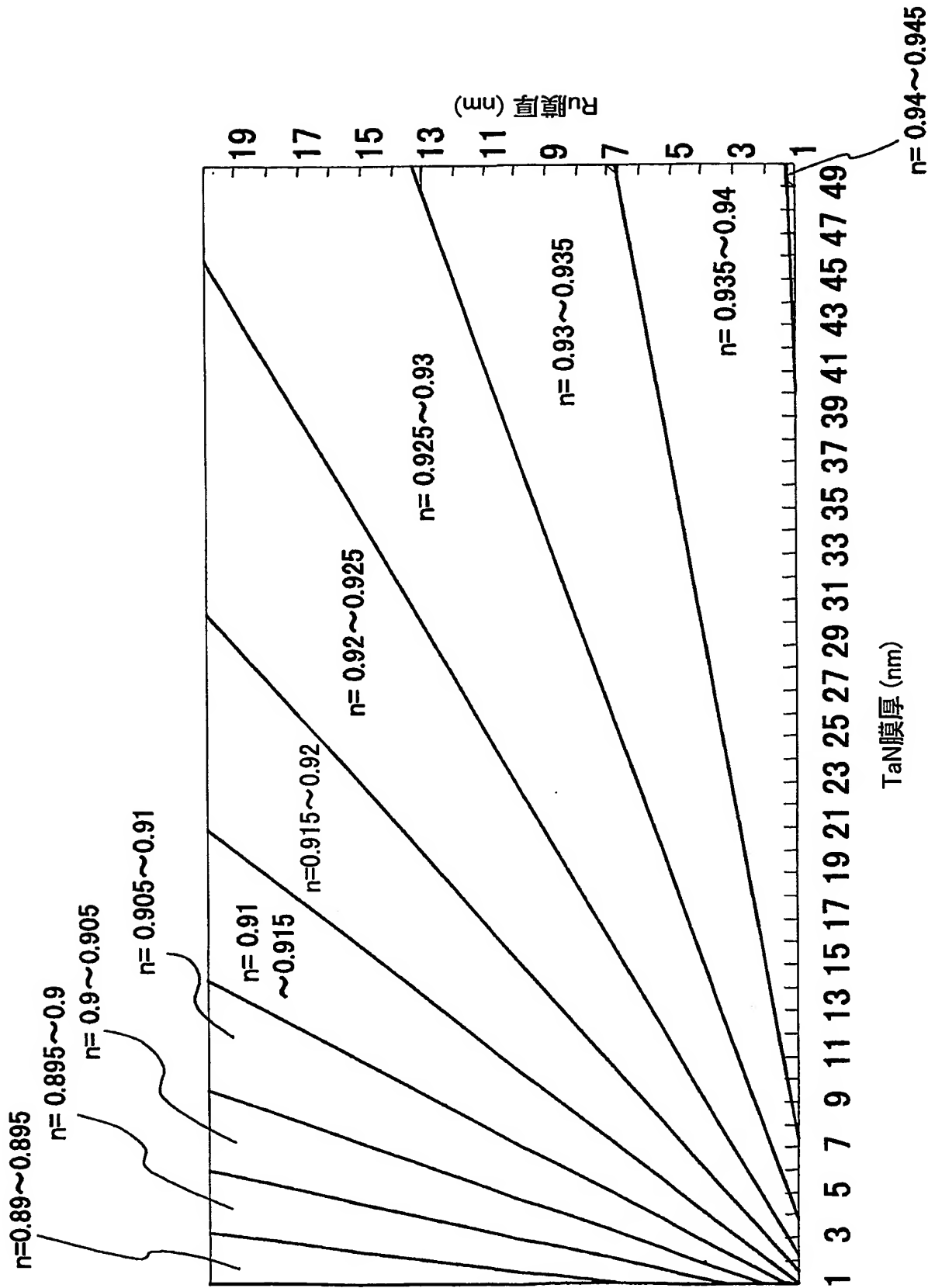
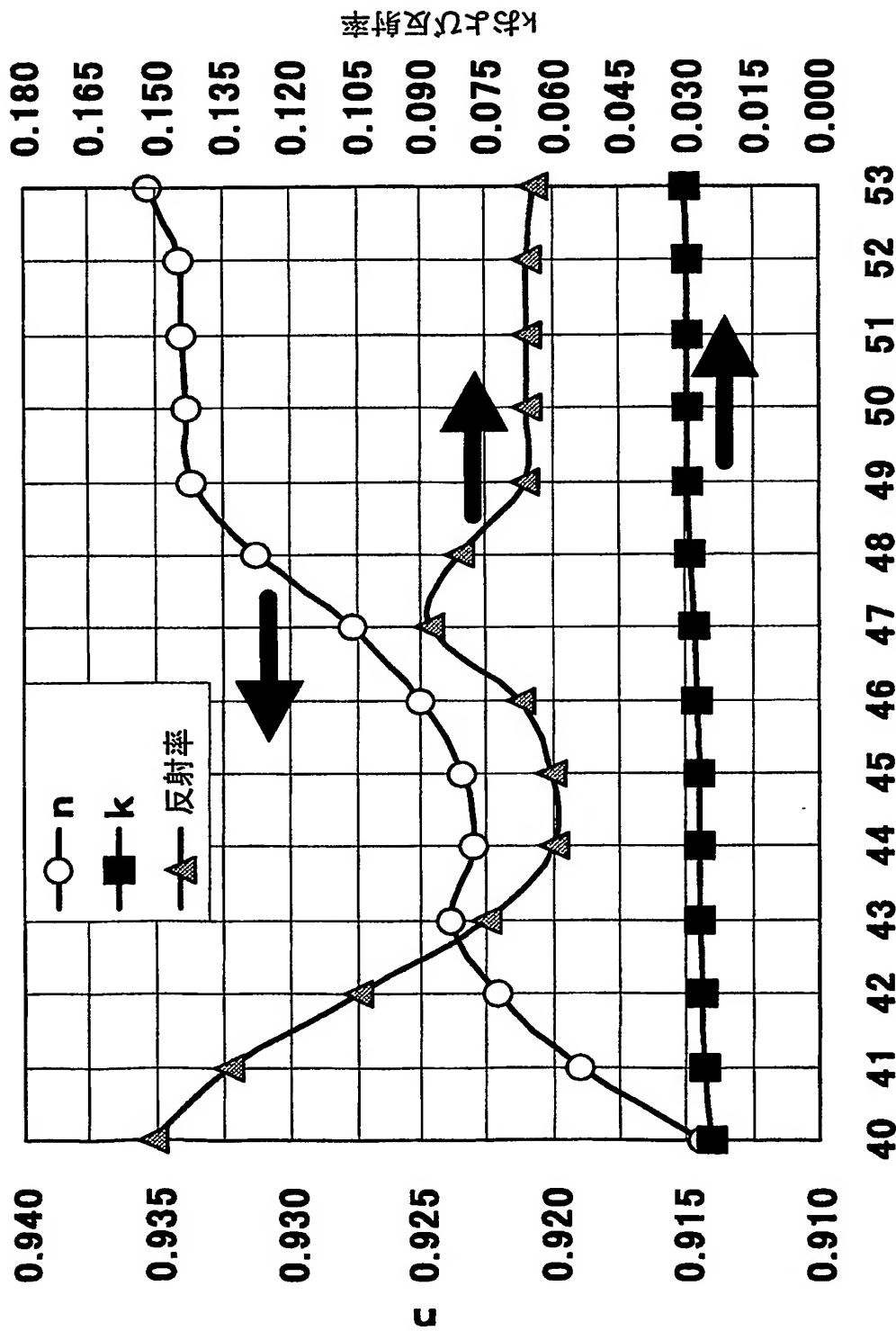


Fig.5



トータル膜厚 (nm)

Fig.6

7/48

| トータル厚 (nm) | Ru厚 (nm) | TaN厚 (nm) |
|------------|----------|-----------|
| 40 | 20 | 20 |
| 41 | 17 | 24 |
| 42 | 15 | 27 |
| 43 | 14 | 29 |
| 44 | 15 | 29 |
| 45 | 15 | 30 |
| 46 | 14 | 32 |
| 47 | 12 | 35 |
| 48 | 9 | 39 |
| 49 | 7 | 42 |
| 50 | 7 | 43 |
| 51 | 7 | 44 |
| 52 | 7 | 45 |
| 53 | 6 | 47 |

Fig.7

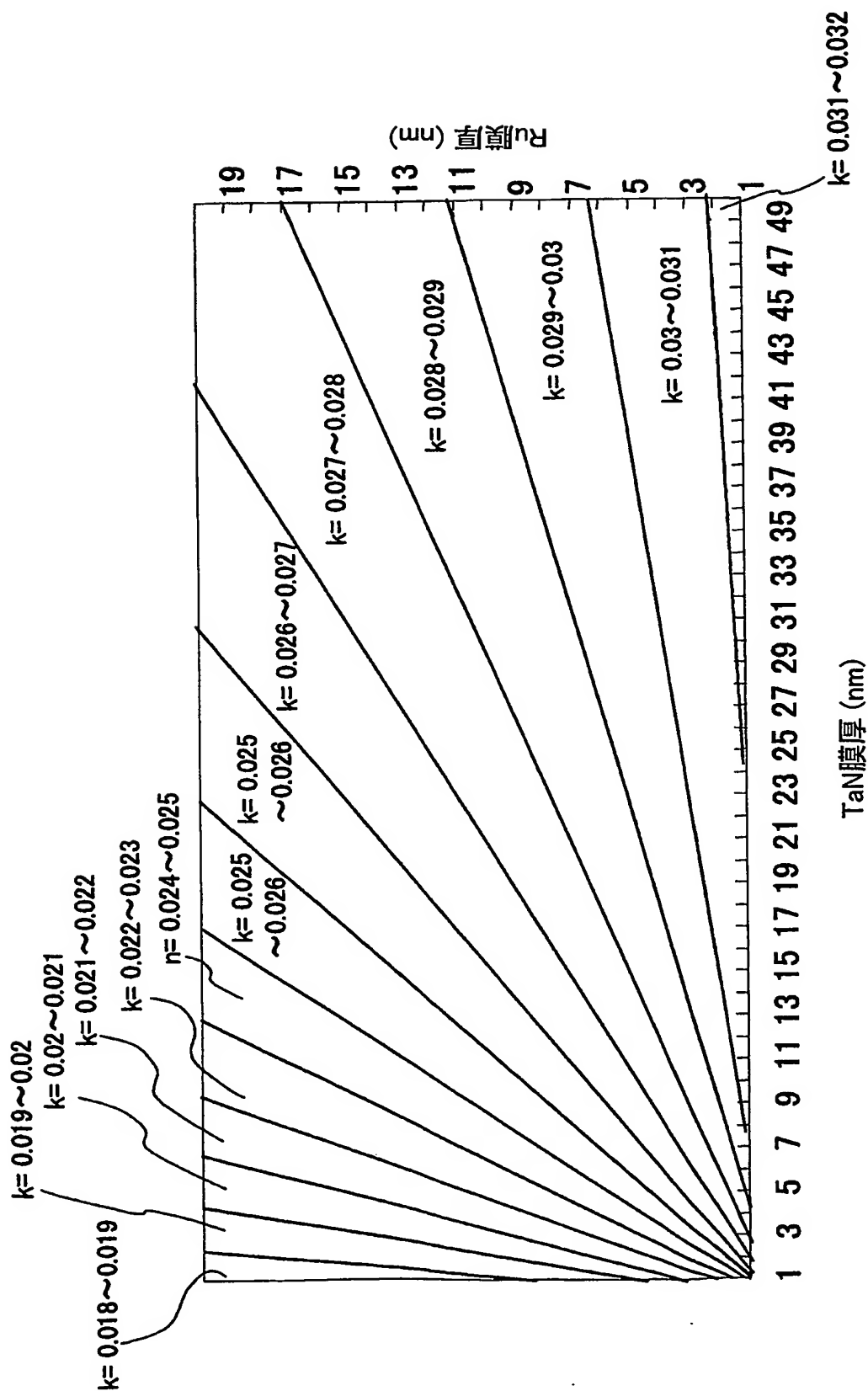


Fig.8

9/48

| 位置差 | | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 | 38 | 39 | 40 | 41 | 42 | 43 | 44 | 45 |
|--------|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Ru/TaN | 3 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 166.7 |
| | 4 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 163.7 | 171.8 | 174.5 |
| | 5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 158.7 | 168.2 | 176.5 | 179.9 | 176.2 |
| | 6 | | | | | | | | | | | | | | | | | 161.8 | 171.2 | 179.7 | 183.6 | 180.3 | 174.7 |
| | 7 | | | | | | | | | | | | | | | | | 172.3 | 181.0 | 185.1 | 181.9 | 176.1 | 176.2 |
| | 8 | | | | | | | | | | | | | 154.6 | 156.1 | 163.0 | 172.4 | 181.0 | 185.1 | 181.9 | 176.1 | 176.2 | 183.0 |
| | 9 | | | | | | | | | | | | | 156.9 | 163.6 | 172.9 | 181.5 | 185.7 | 182.7 | 177.0 | 183.7 | 183.9 | |
| | 10 | | | | | | | | | | | | | 166.2 | 175.3 | 183.9 | 188.4 | 185.9 | 180.4 | 180.0 | 186.3 | 186.3 | |
| | 11 | | | | | | 158.3 | 165.7 | 169.4 | 167.6 | 164.2 | 164.8 | 170.7 | 179.5 | 188.2 | 191.5 | 186.1 | 185.1 | 180.8 | | | | |
| | 12 | | | | 155.4 | 163.3 | 170.9 | 175.1 | 174.0 | 170.5 | 170.6 | 175.9 | 184.5 | 193.2 | 198.7 | 197.9 | 192.8 | 191.1 | 186.0 | | | | |
| | 13 | | | 159.8 | 167.6 | 175.4 | 180.0 | 179.5 | 176.0 | 175.5 | 180.4 | 188.7 | 197.5 | 203.5 | | | | | | | | | |
| | 14 | | | 162.4 | 170.1 | 178.0 | 182.9 | 182.6 | 179.1 | 178.3 | 182.9 | 191.2 | | | | | | | | | | | |
| | 15 | 163.0 | 170.7 | 178.6 | 183.6 | 183.3 | 179.7 | 179.9 | 183.4 | 191.7 | | | | | | | | | | | | | |
| | 16 | 170.6 | 178.5 | 183.4 | 183.2 | 179.6 | 178.8 | 183.4 | 191.6 | | | | | | | | | | | | | | |
| | 17 | 179.5 | 184.5 | 184.5 | 181.1 | 180.2 | 185 | 193 | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 18 | 187.9 | 188.3 | 185.2 | 184.1 | 188.1 | 195.8 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 19 | | 191.4 | 189.9 | 193.3 | 200.7 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 20 | | 186.0 | 198.8 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 21 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 22 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 23 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

| ハーフトーン反射率範囲 | | 8-10 | 4-6 | % | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------|----|------|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| Ru/TaN | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 | 38 | 39 | 40 | 41 | 42 | 43 | 44 | 45 | |
| | 3 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 68 |
| | 4 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 54 |
| | 5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 74 |
| | 6 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 46 |
| | 7 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 48 |
| | 8 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 59 |
| | 9 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 68 |
| | 10 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 71 |
| | 11 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 74 |
| | 12 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 13 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 14 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 15 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 16 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 17 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 18 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 19 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 20 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 21 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 22 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 23 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Fig.9

10/48

位相差

| Ru/Cr | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 |
|-------|-------|-------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 0 | | | | | | 106.3 | 159.4 | 168.7 | 178.9 | 186.2 | 186.8 | 180.9 | 177.5 |
| 1 | | | | | | | | | | 133.953 | 128.115 | 124.696 | 129.087 |
| 2 | | | | | | | | | | | 126.647 | 130.742 | 140.4 |
| 3 | | | | | | | | | | | 134.212 | 143.416 | 154.824 |
| 4 | | | | | | | | | | 138.817 | 147.444 | 158.579 | 168.608 |
| 5 | | | | | | | | | 158.6 | 151.3 | 162.2 | 172.4 | 177.5 |
| 6 | | | | | | | | 146.2 | 154.0 | 164.7 | 175.0 | 180.5 | 177.2 |
| 7 | | | | | | | 147.361 | 155.0 | 165.7 | 176.0 | 181.7 | 178.6 | 170.8 |
| 8 | | | | | | 147.4 | 155.0 | 165.8 | 176.1 | 181.7 | 178.7 | 170.9 | 169.9 |
| 9 | | | 286.0 | 146.5 | 148.0 | 155.5 | 166.1 | 176.4 | 182.1 | 179.2 | 171.6 | 170.5 | 177.8 |
| 10 | | 153.3 | 149.2 | 150.3 | 157.5 | 167.9 | 178.1 | 184.0 | 181.71 | 174.41 | 173.034 | 179.92 | 191.385 |
| 11 | 157.9 | 153.9 | 154.6 | 161.2 | 171.2 | 181.35 | 187.667 | 186.276 | 179.45 | 177.51 | 183.68 | 194.657 | 206.692 |
| 12 | 159.5 | 159.6 | 165.6 | 175.3 | 185.39 | 192.153 | 191.711 | 185.37 | 182.8 | 188.174 | 198.644 | 210.516 | 219.835 |
| 13 | 164.0 | 169.5 | 178.9 | 188.971 | 196.115 | 196.419 | 190.458 | 187.361 | 192.079 | 202.151 | | | |
| 14 | 172 | 181 | 191.146 | 198.528 | 199.238 | 193.435 | 194.351 | 204.231 | 215.995 | | | | |

| Ru/Cr | 38 | 39 | 40 | 41 | 42 | 43 | 44 | 45 | 46 | 47 | 48 | 49 | 50 |
|-------|---------|---------|-------|-------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0 | 182.0 | 191.9 | 203.7 | 213.5 | 216.3 | 208.7 | 200.9 | 203.7 | 214.2 | 227.8 | 240.4 | 246.7 | 238.9 |
| 1 | 138.996 | 150.8 | 160.6 | 163.4 | 155.9 | 148.1 | 150.8 | 161.3 | 174.8 | 367.4 | 373.7 | 366.1 | 171.8 |
| 2 | 152.0 | 161.9 | 165.0 | 158.0 | 150.2 | 152.6 | 162.7 | 176.0 | 188.6 | 195.1 | 188.2 | 174.2 | 173.5 |
| 3 | 164.7 | 168.5 | 162.4 | 154.6 | 156.2 | 165.7 | 178.7 | 191.2 | 198.2 | 192.6 | 179.1 | 177.3 | 187.0 |
| 4 | 173.1 | 168.2 | 160.3 | 161.0 | 169.8 | 182.3 | 194.8 | 202.4 | 198.4 | 185.4 | 182.4 | 191.1 | |
| 5 | 173.6 | 165.8 | 165.6 | 173.7 | 185.8 | 198.3 | 206.4 | 203.8 | 191.4 | 187.3 | 195.0 | 208.5 | |
| 6 | 169.5 | 168.7 | 176.3 | 188.3 | 200.701 | 209.2 | 207.5 | 195.5 | 195.5 | | | | |
| 7 | 169.8 | 177.3 | 189.2 | 201.7 | 210.3 | 208.9 | 197.0 | 191.8 | | | | | |
| 8 | 177.3 | 189.252 | 201.7 | 210.4 | 209.0 | | | | | | | | |
| 9 | 189.621 | 202.003 | | | | | | | | | | | |
| 10 | 203.604 | | | | | | | | | | | | |
| 11 | 215.695 | | | | | | | | | | | | |
| 12 | 221.344 | | | | | | | | | | | | |
| 13 | | | | | | | | | | | | | |
| 14 | | | | | | | | | | | | | |

Fig.10

11/48

ハーフトーン反射率 4-6%

| Ru/Cr | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 |
|-------|------|------|------|------|------|---------|------|------|------|------|---------|---------|-----|
| 0 | | | | | | 12.9 | 12.9 | 13.0 | 11.1 | 8.3 | 6.0 | 5.3 | 6.2 |
| 1 | | | | | | | | | | 6.0 | 5.3 | 6.3 | 7.8 |
| 2 | | | | | | | | | | | 6.52266 | 8.06266 | 8.7 |
| 3 | | | | | | | | | | | 8.5 | 9.2 | 8.4 |
| 4 | | | | | | | | | | 8.9 | 9.8 | 9.1 | 7.1 |
| 5 | | | | | | | | | 2.8 | 10.3 | 9.7 | 7.6 | 5.3 |
| 6 | | | | | | | | 9.4 | 10.5 | 10.0 | 8.0 | 5.5 | 4.0 |
| 7 | | | | | | 9.32535 | 10.5 | 10.0 | 8.0 | 5.6 | 4.0 | 4.0 | 4.0 |
| 8 | | | | | | 9.3 | 10.4 | 10.0 | 8.0 | 5.6 | 4.0 | 4.0 | 5.2 |
| 9 | | | 6.0 | 7.9 | 9.5 | 10.7 | 10.2 | 8.2 | 5.8 | 4.1 | 4.1 | 5.4 | 6.6 |
| 10 | | 8.1 | 8.4 | 10.1 | 11.3 | 10.9 | 8.8 | 6.3 | 4.5 | 4.4 | 5.6 | 6.9 | 7.2 |
| 11 | 9.0 | 9.1 | 10.7 | 12.0 | 11.7 | 9.7 | 7.0 | 5.0 | 4.8 | 6.0 | 7.4 | 7.7 | 6.5 |
| 12 | 9.7 | 11.3 | 12.7 | 12.5 | 10.5 | 7.7 | 5.6 | 5.1 | 6.2 | 7.7 | 8.2 | 7.1 | 5.1 |
| 13 | 11.6 | 13.1 | 13.0 | 11.1 | 8.3 | 6.0 | 5.3 | 6.4 | 7.9 | 8.4 | | | |
| 14 | 13.1 | 13.1 | 11.3 | 8.4 | 6.1 | 5.3 | 7.8 | 8.5 | 7.6 | | | | |

| Ru/Cr | 38 | 39 | 40 | 41 | 42 | 43 | 44 | 45 | 46 | 47 | 48 | 49 | 50 |
|-------|--------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 0 | 7.7 | 8.4 | 7.5 | 5.5 | 3.6 | 2.7 | 3.3 | 4.5 | 5.4 | 5.1 | 3.8 | 2.3 | 1.4 |
| 1 | 8.4 | 7.5 | 5.6 | 3.6 | 2.8 | 3.3 | 4.5 | 5.4 | 5.1 | 3.9 | 2.3 | 1.4 | 1.6 |
| 2 | 7.9 | 5.9 | 3.9 | 2.9 | 3.4 | 4.7 | 5.6 | 5.3 | 4.1 | 2.5 | 1.5 | 1.7 | 2.6 |
| 3 | 6.4 | 4.3 | 3.2 | 3.6 | 4.9 | 5.9 | 5.7 | 4.4 | 2.8 | 1.7 | 1.8 | 2.7 | 3.7 |
| 4 | 4.8 | 3.5 | 3.8 | 5.1 | 6.2 | 6.1 | 4.8 | 3.1 | 1.9 | 1.9 | 2.8 | 3.8 | |
| 5 | 3.8 | 4.0 | 5.2 | 6.4 | 6.4 | 5.2 | 3.4 | 2.1 | 2.0 | 2.8 | 3.9 | 4.3 | |
| 6 | 4.0 | 5.3 | 6.5 | 6.6 | 5.4 | 3.6 | 2.2 | 2.0 | | | | | |
| 7 | 5.2 | 6.5 | 6.6 | 5.5 | 3.7 | 2.3 | 2.0 | 2.8 | | | | | |
| 8 | 6.5 | 6.6 | 5.5 | 3.7 | 2.3 | | | | | | | | |
| 9 | 6.8 | 5.6 | | | | | | | | | | | |
| 10 | 6.0 | | | | | | | | | | | | |
| 11 | 4.5986 | | | | | | | | | | | | |
| 12 | 3.3 | | | | | | | | | | | | |
| 13 | | | | | | | | | | | | | |
| 14 | | | | | | | | | | | | | |

Fig.11

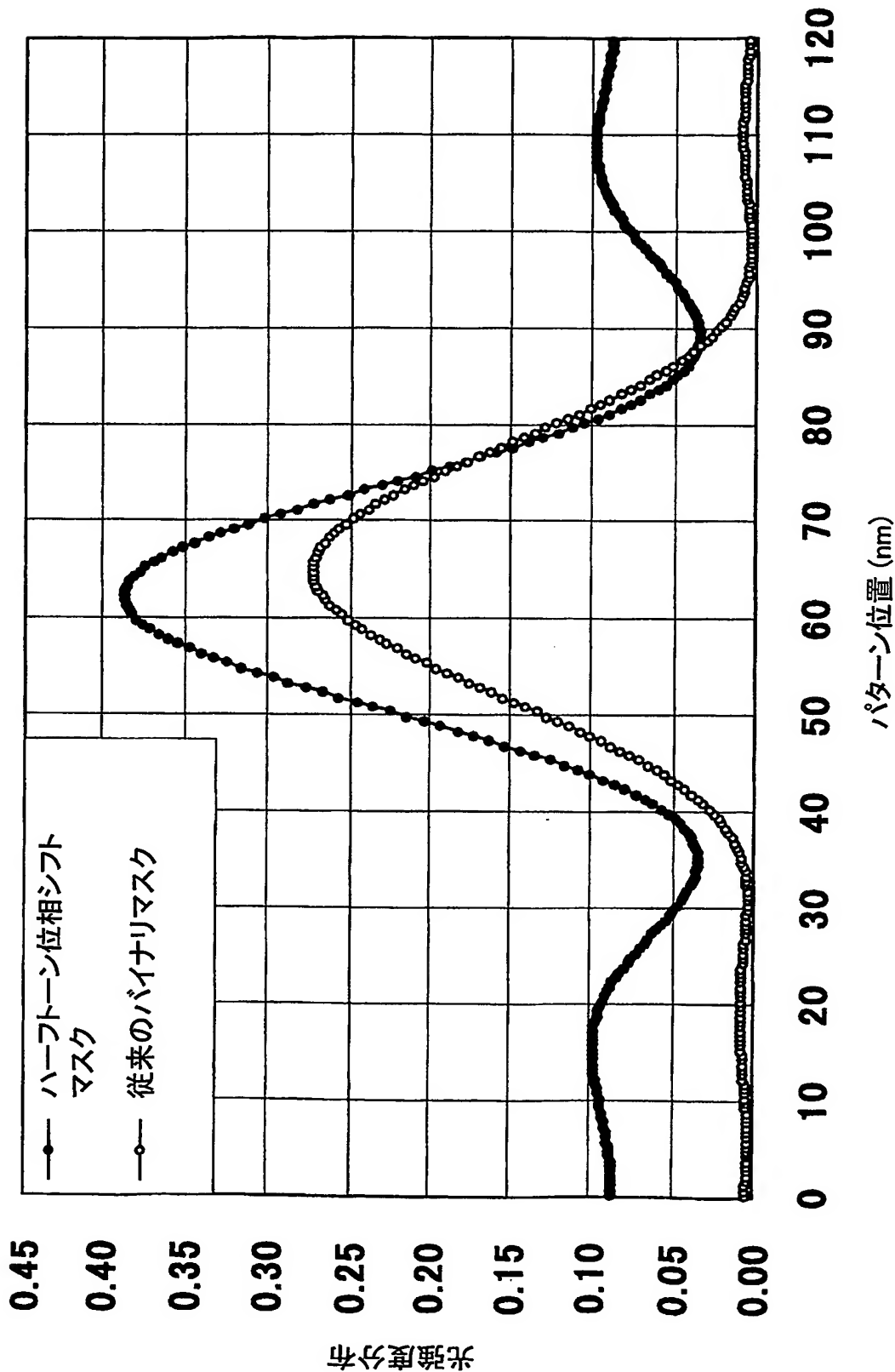


Fig.12

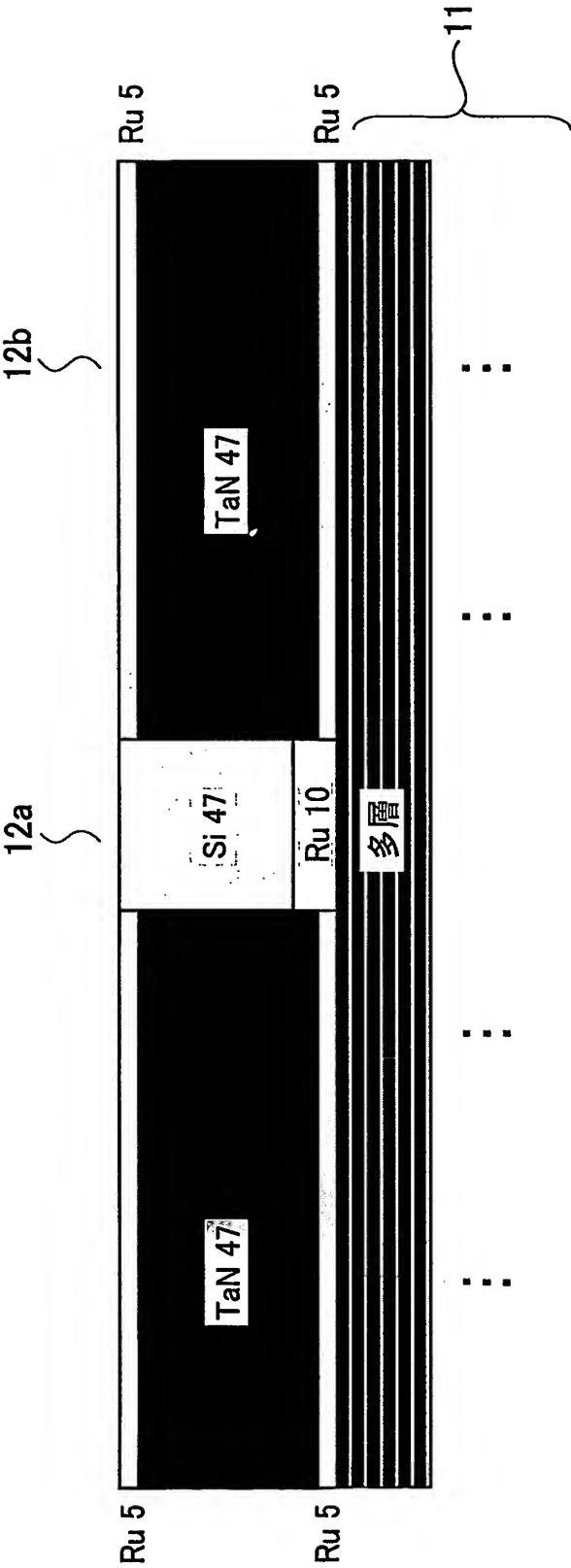


Fig.13

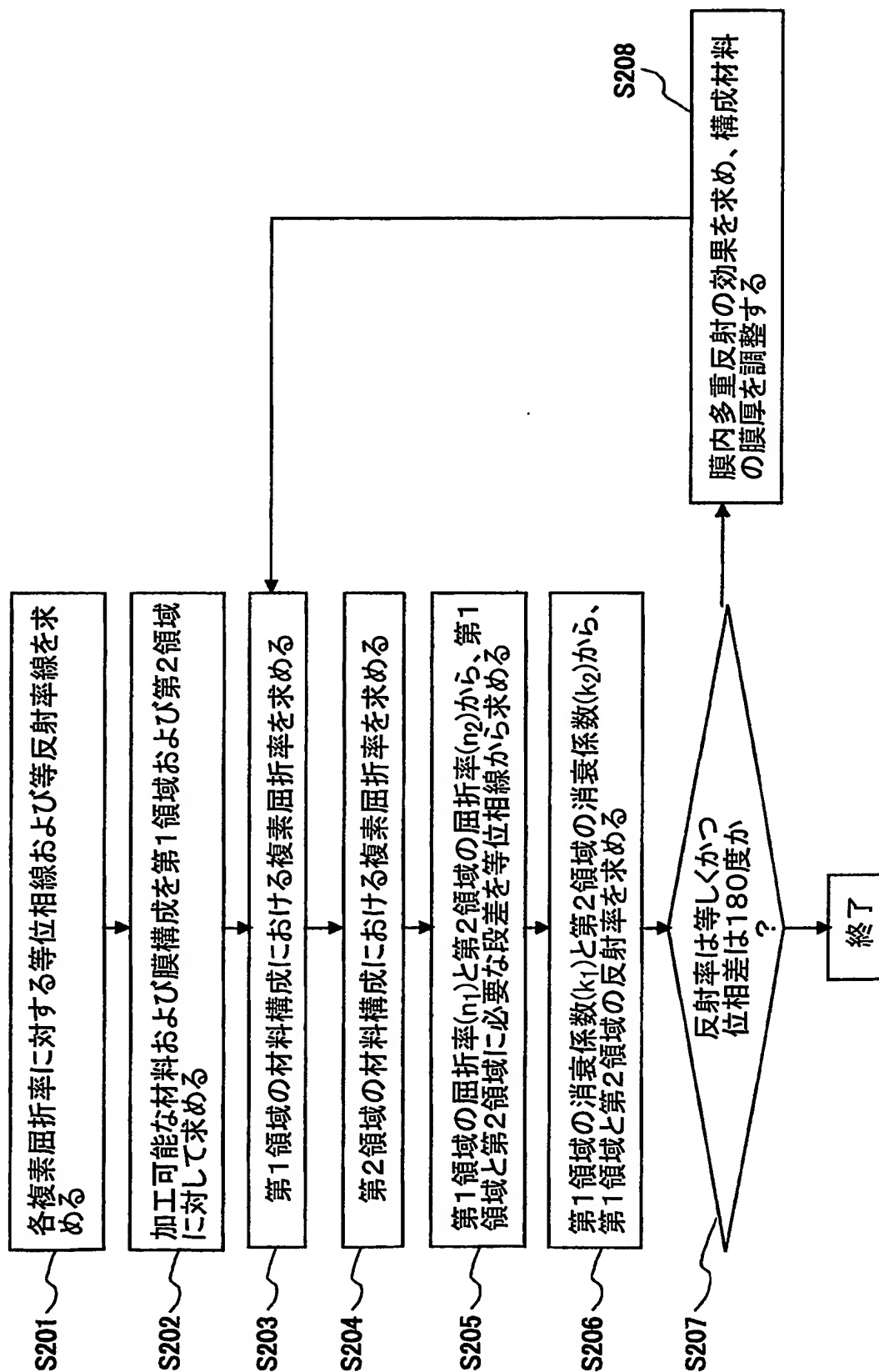


Fig.14

15/48

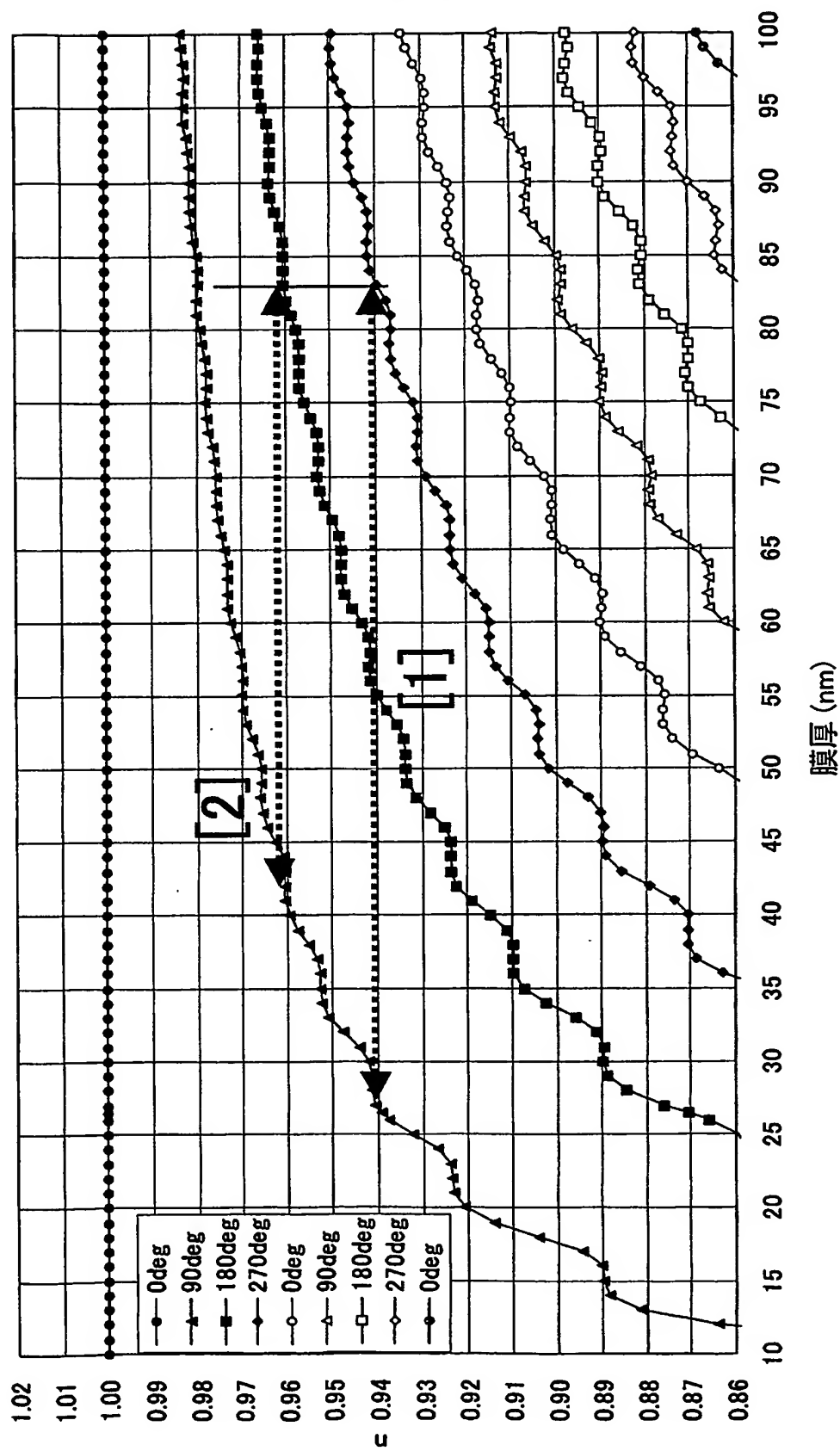


Fig.15

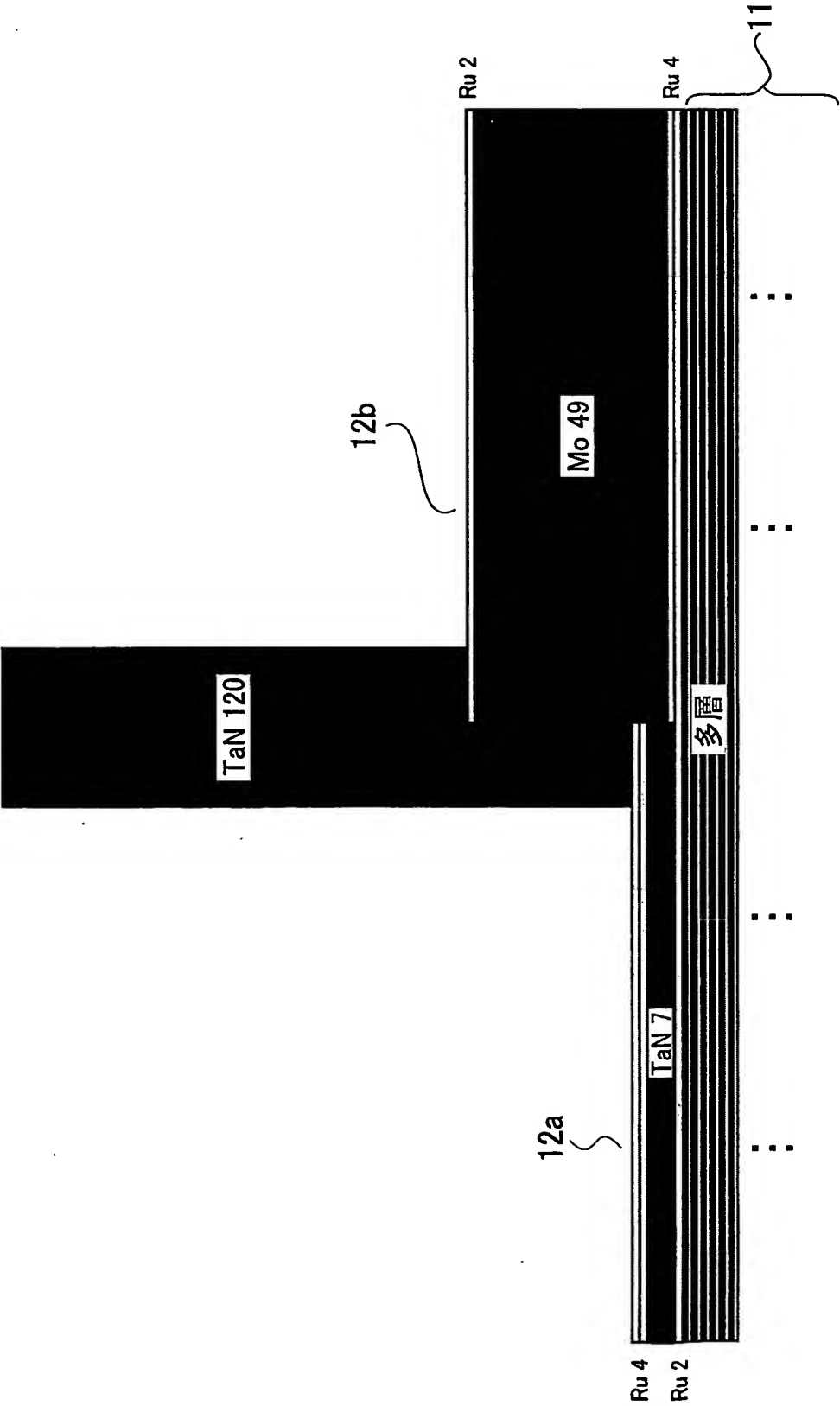


Fig.16

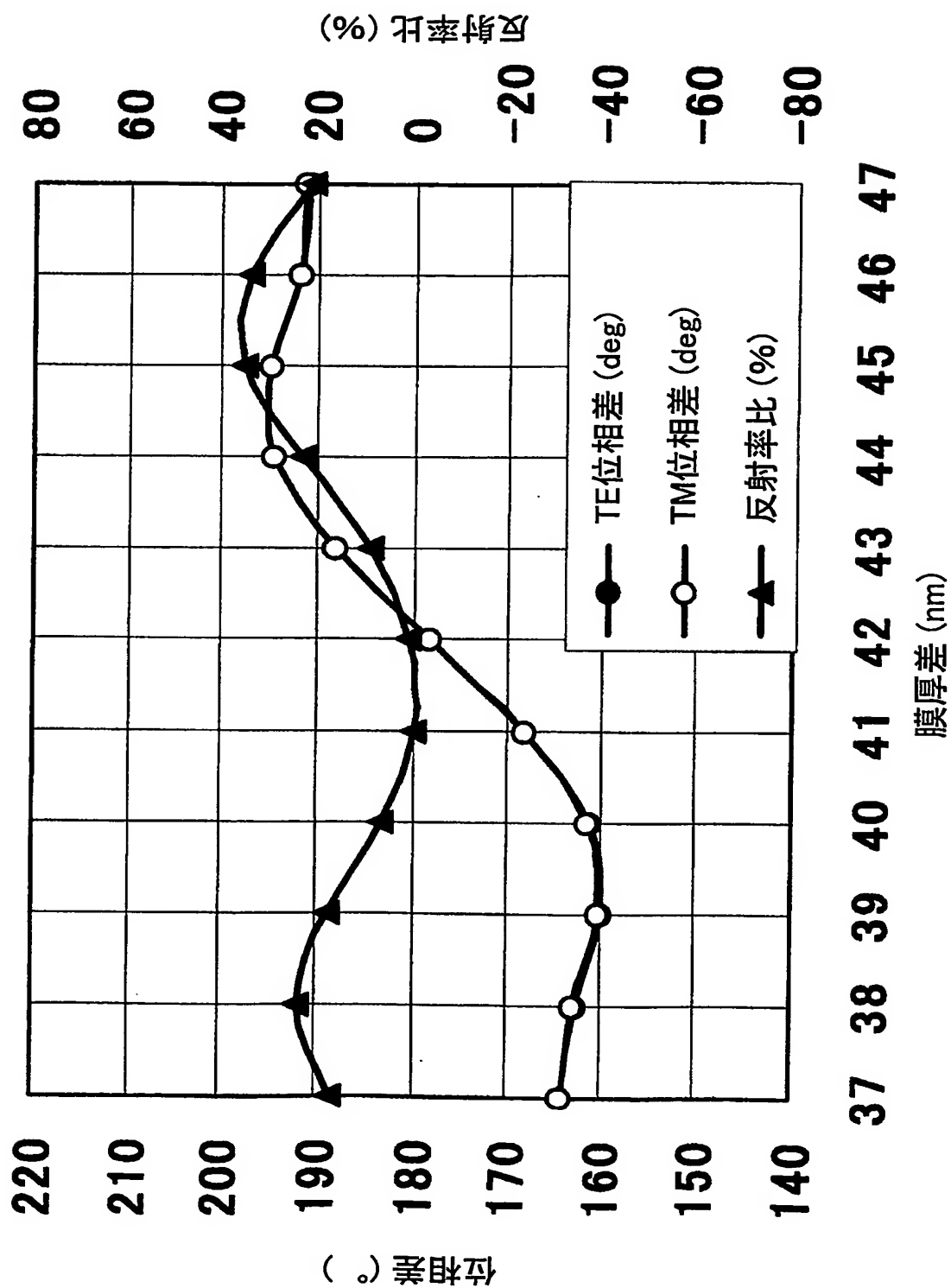


Fig.17

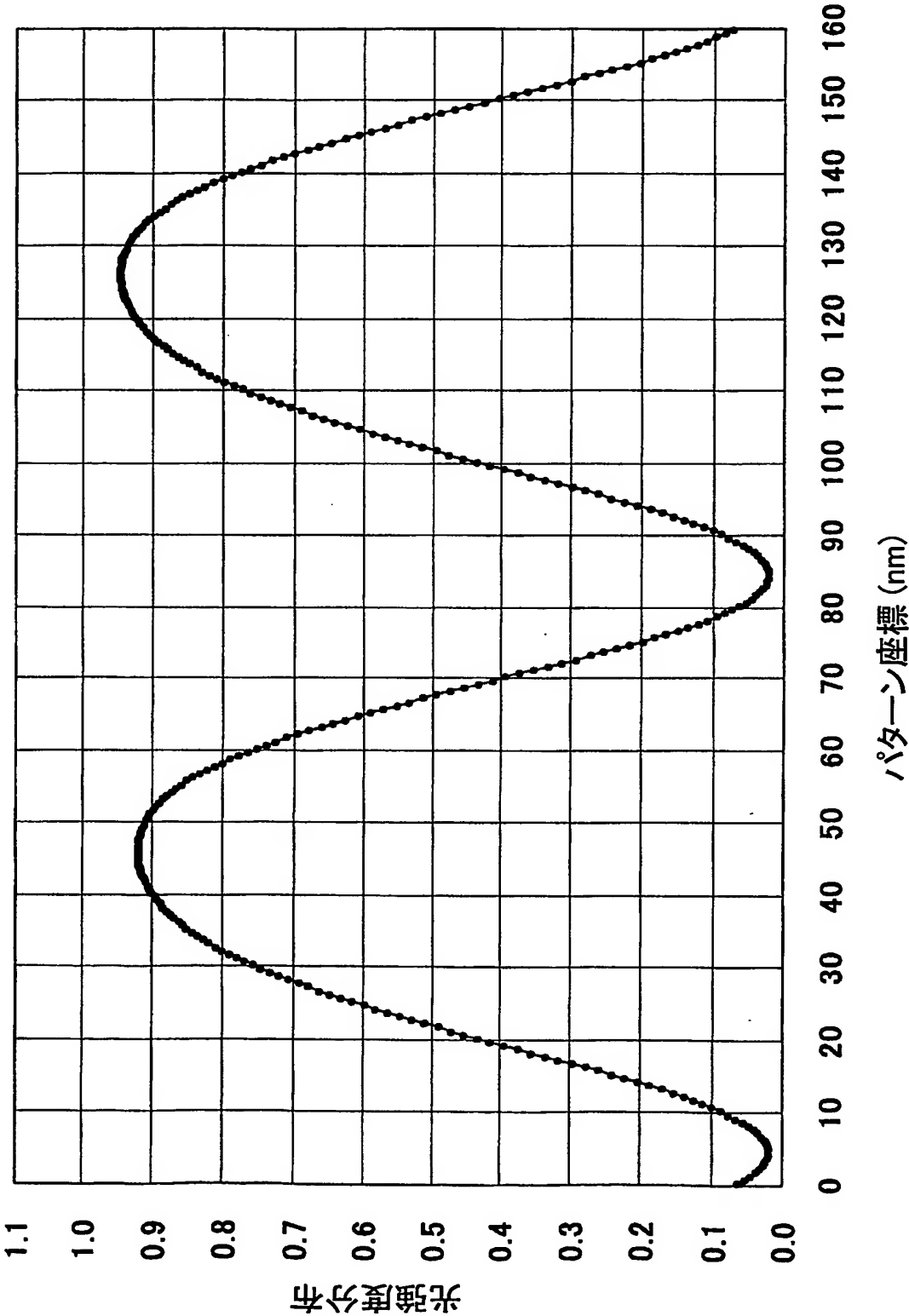


Fig.18

19/48

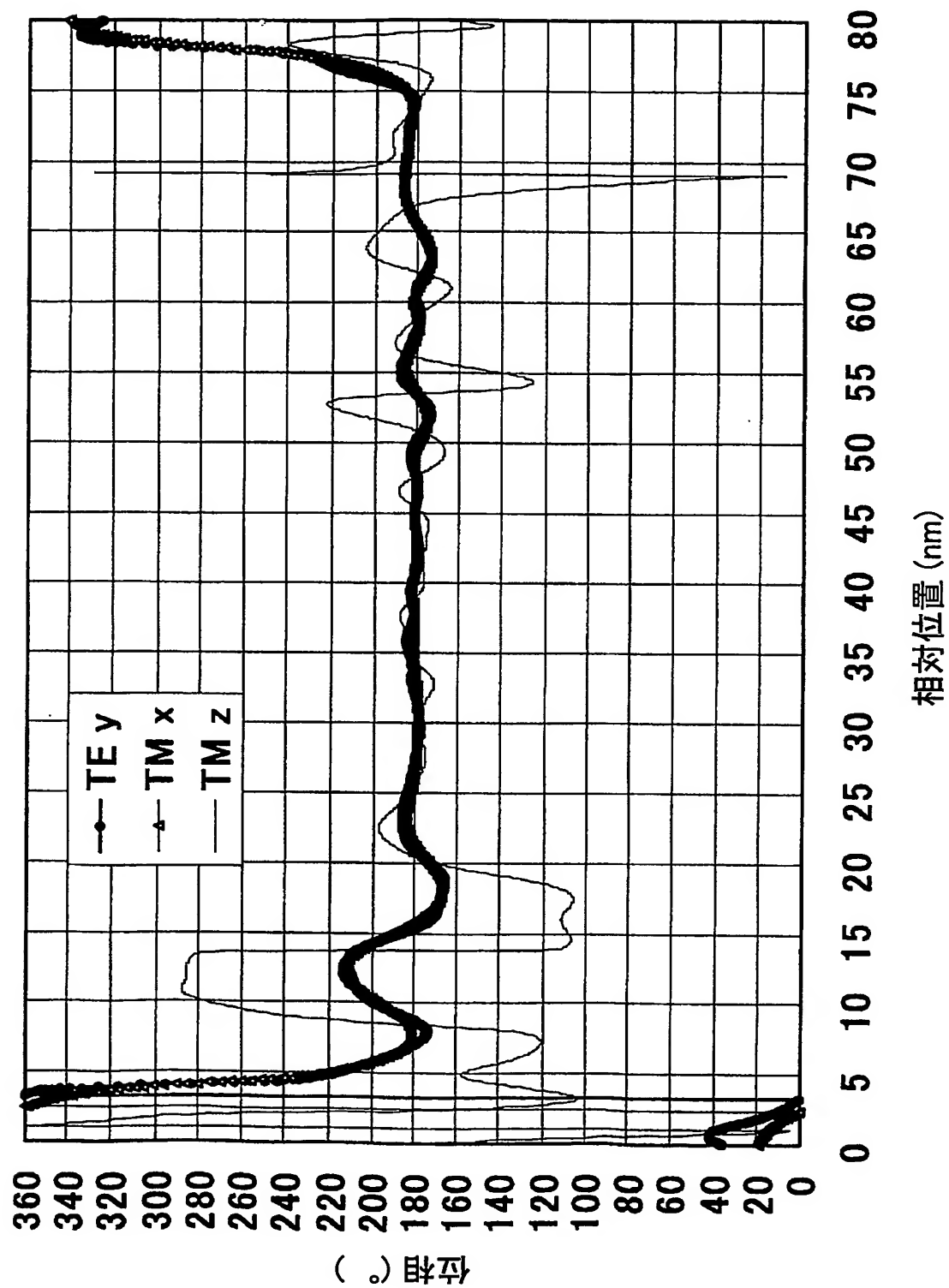


Fig.19

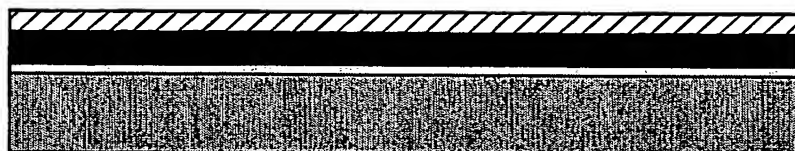
20/48



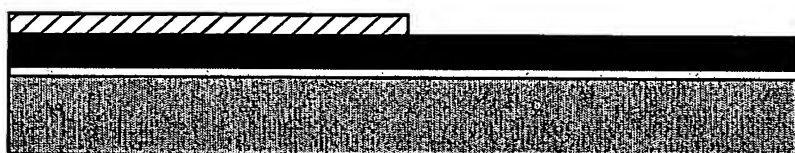
工程1 Ruコート



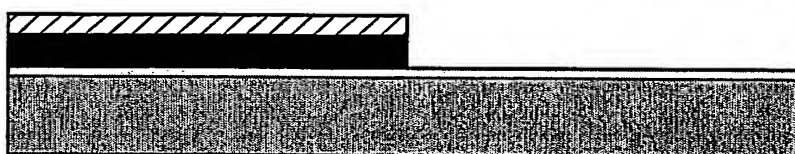
工程2 TaNコート



工程3 レジストコート



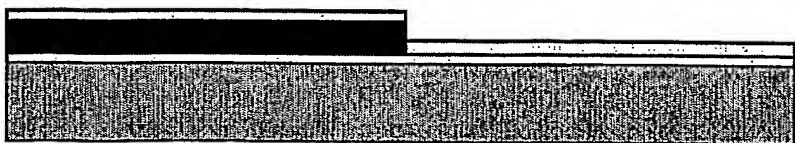
工程4 レジストパターンニング



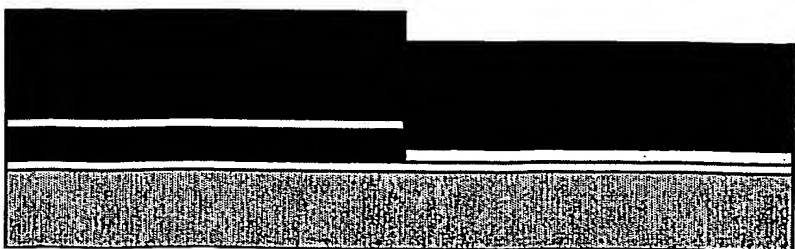
工程5 TaNエッチング



工程6 レジスト剥離



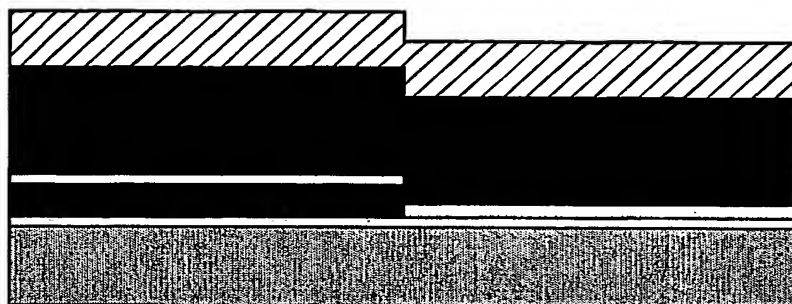
工程7 Ruコート



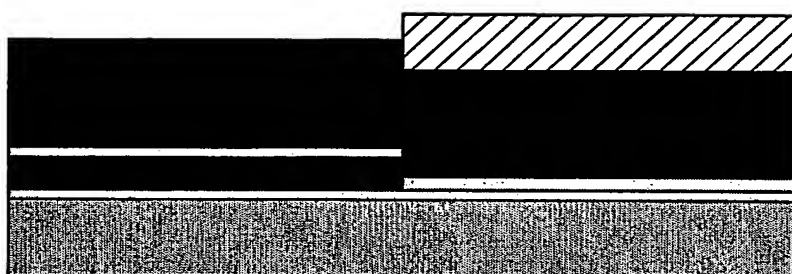
工程8 Moコート

Fig.20

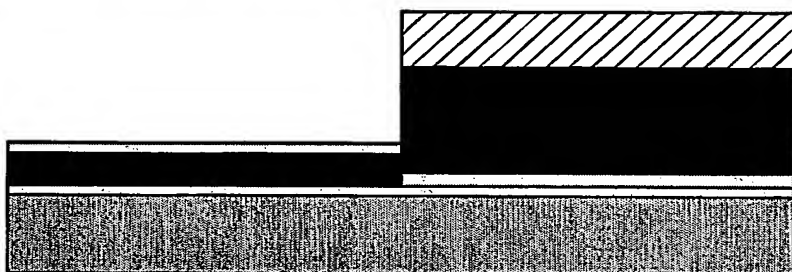
21/48



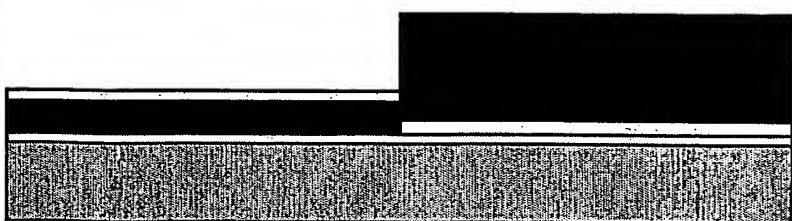
工程9 レジストコート



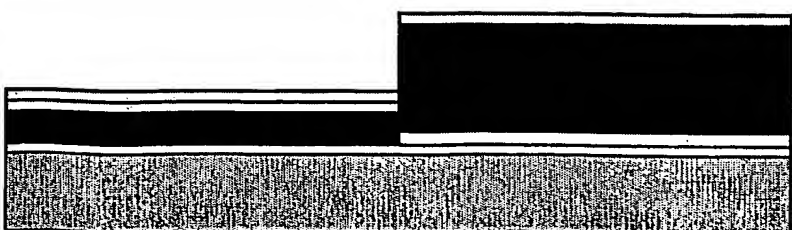
工程10 レジストパターニング



工程11 Moエッチング



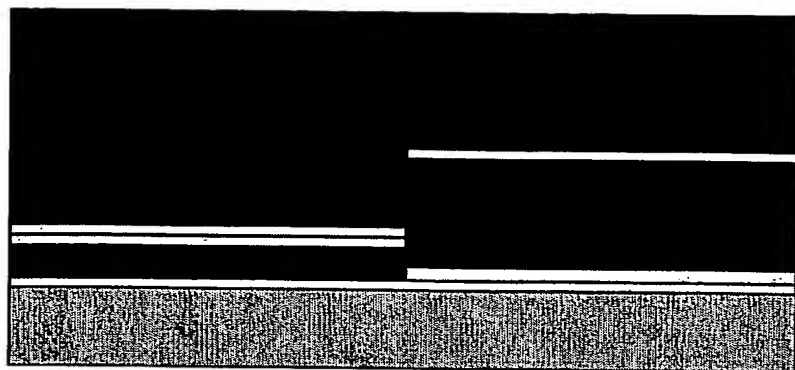
工程12 レジスト剥離



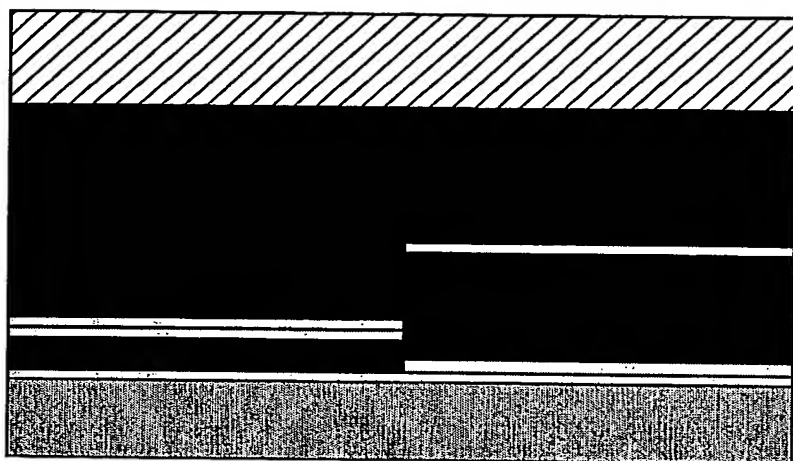
工程13 Ruコート

Fig.21

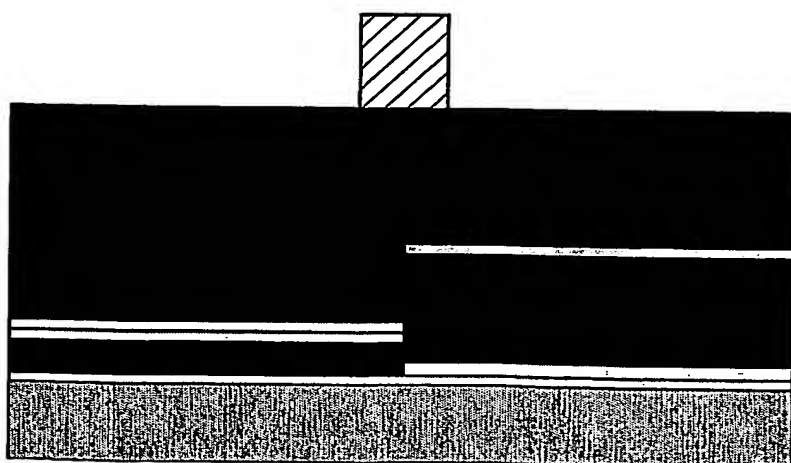
22/48



工程14 TaNコート



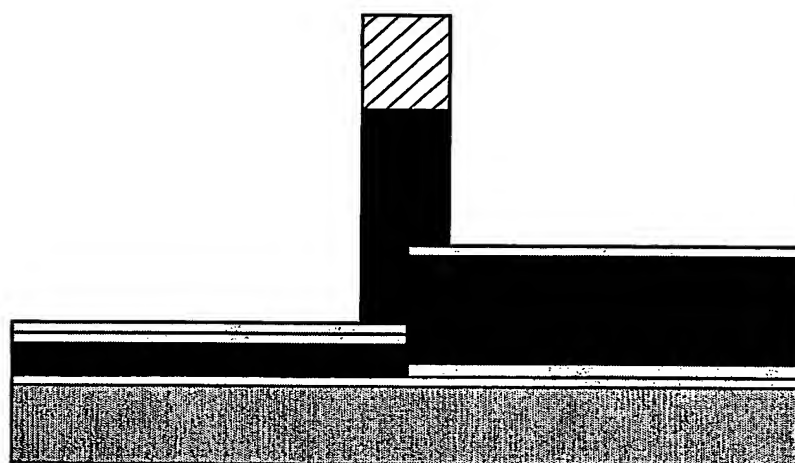
工程15 レジストコート



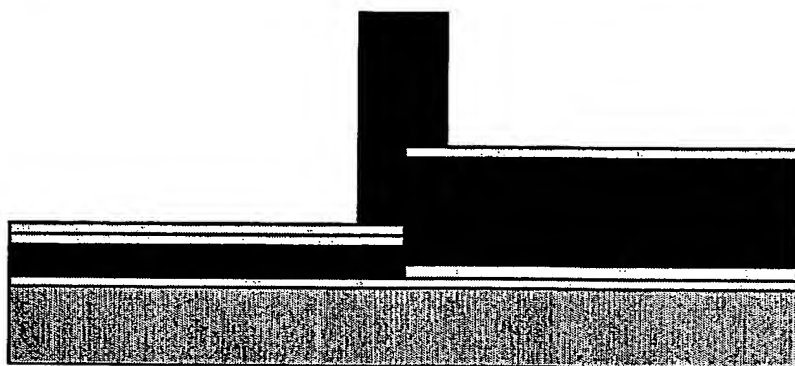
工程16 レジストパターニング

Fig.22

23/48



工程17 TaNエッチング



工程18 レジスト剥離

Fig.23

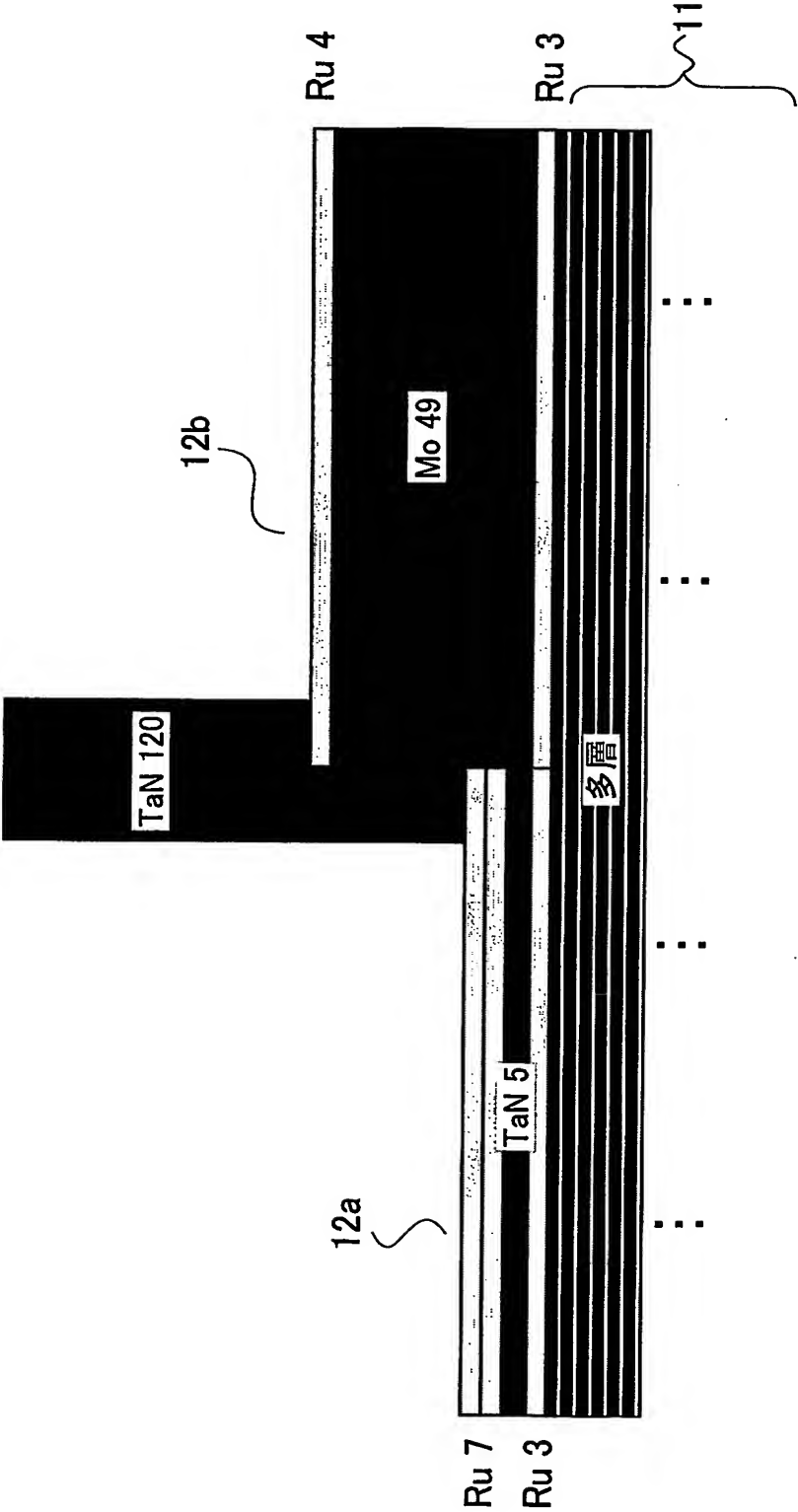


Fig.24

25/48

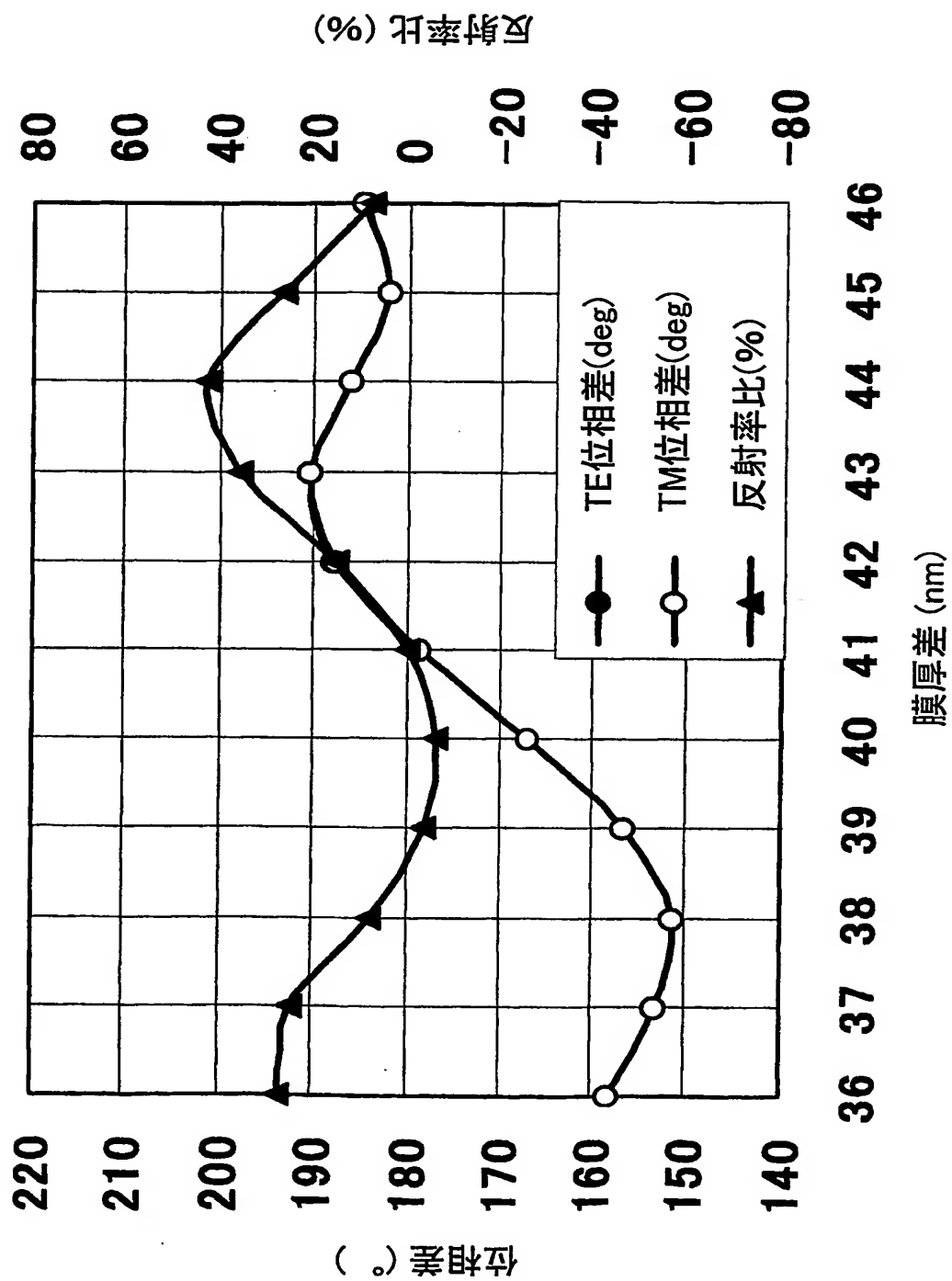


Fig.25

26/48

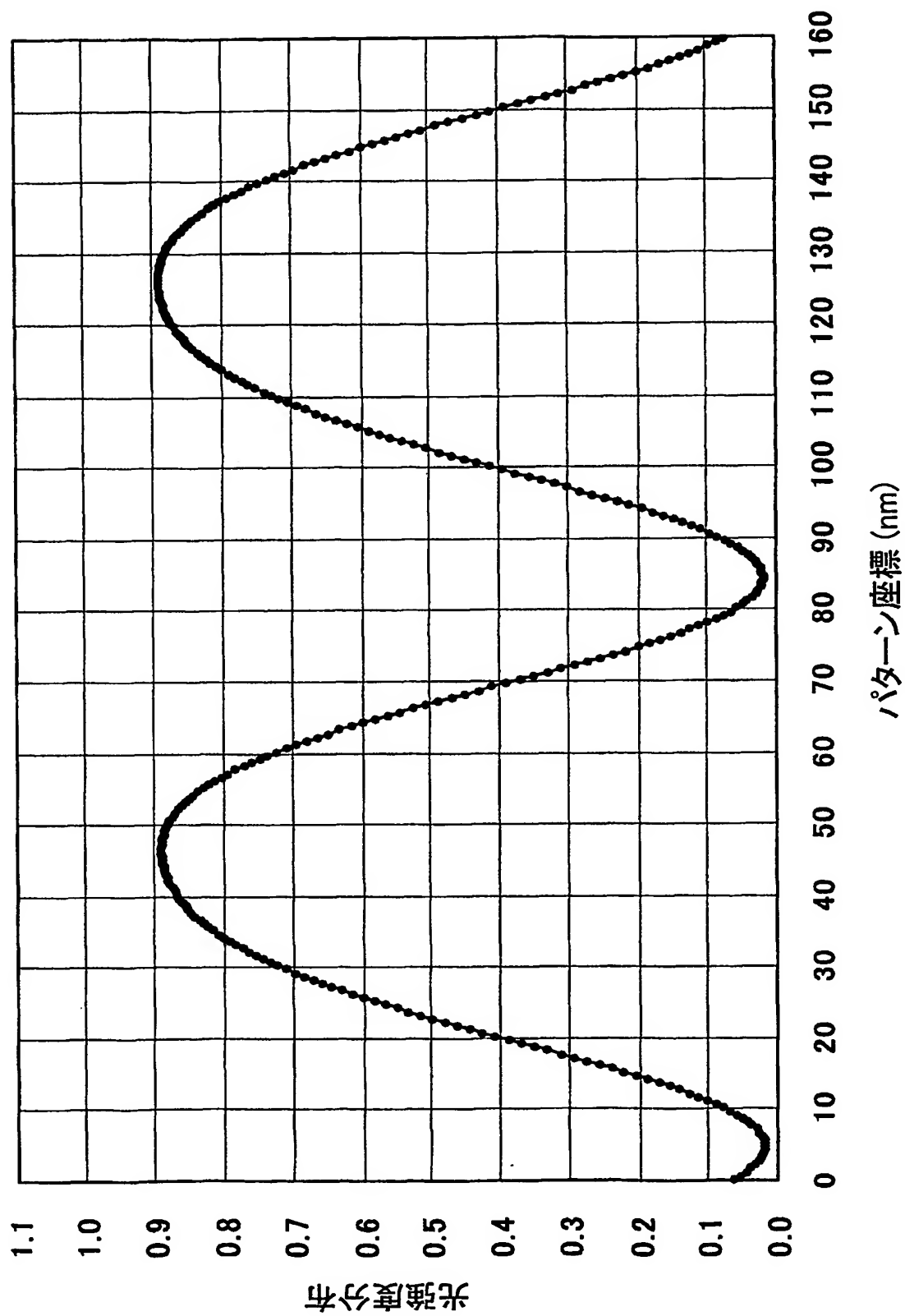


Fig.26

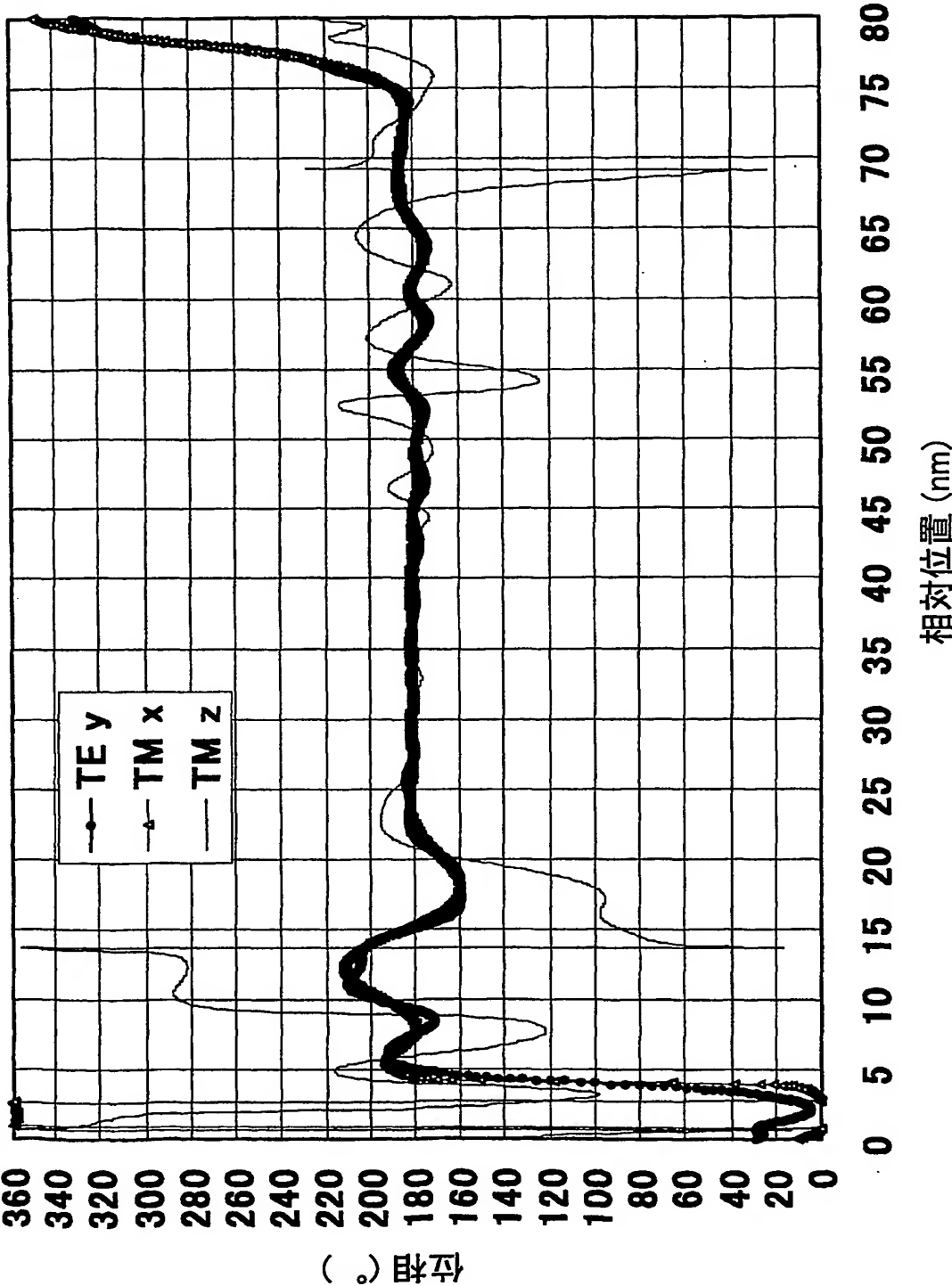


Fig.27

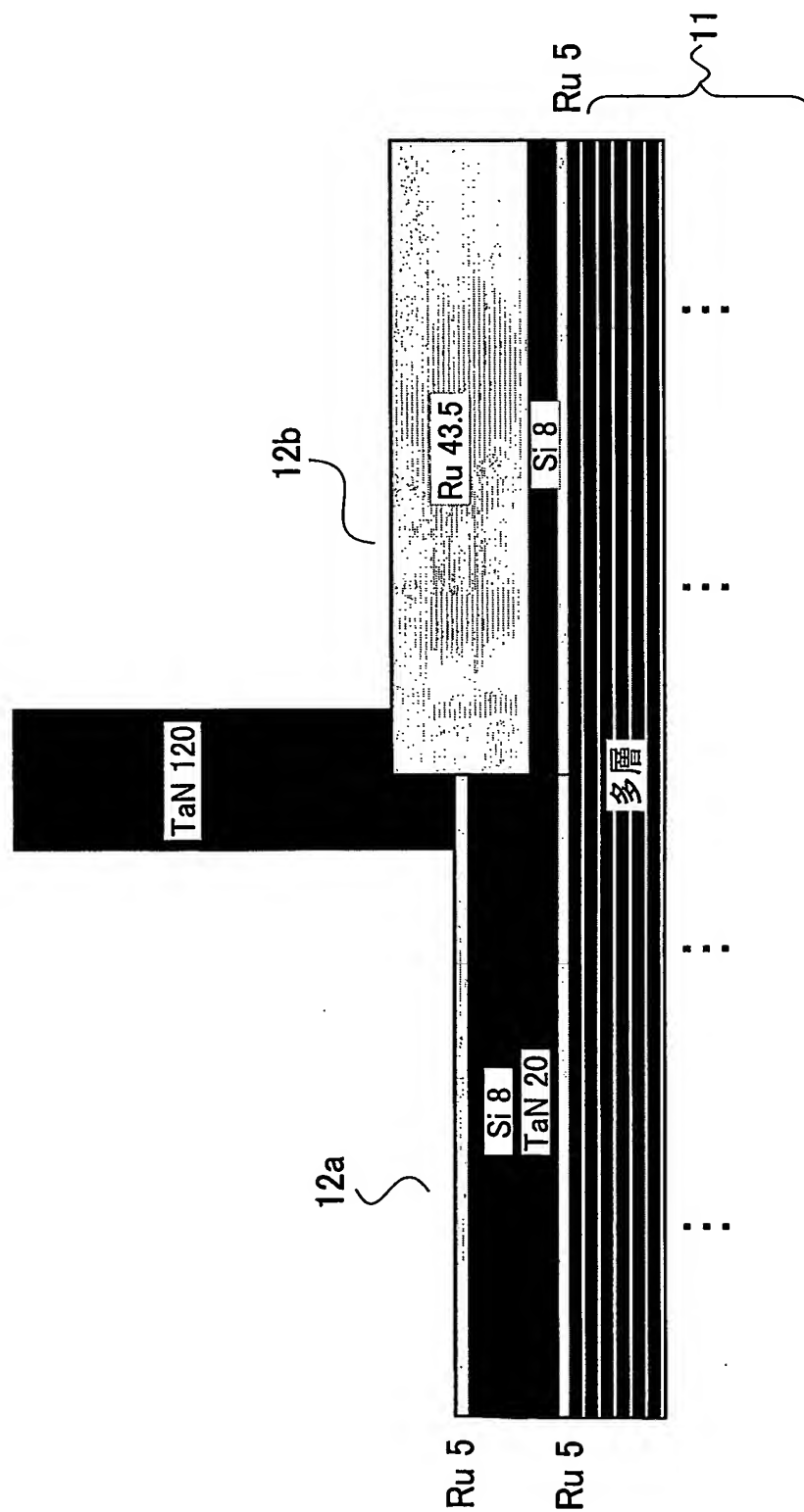


Fig.28

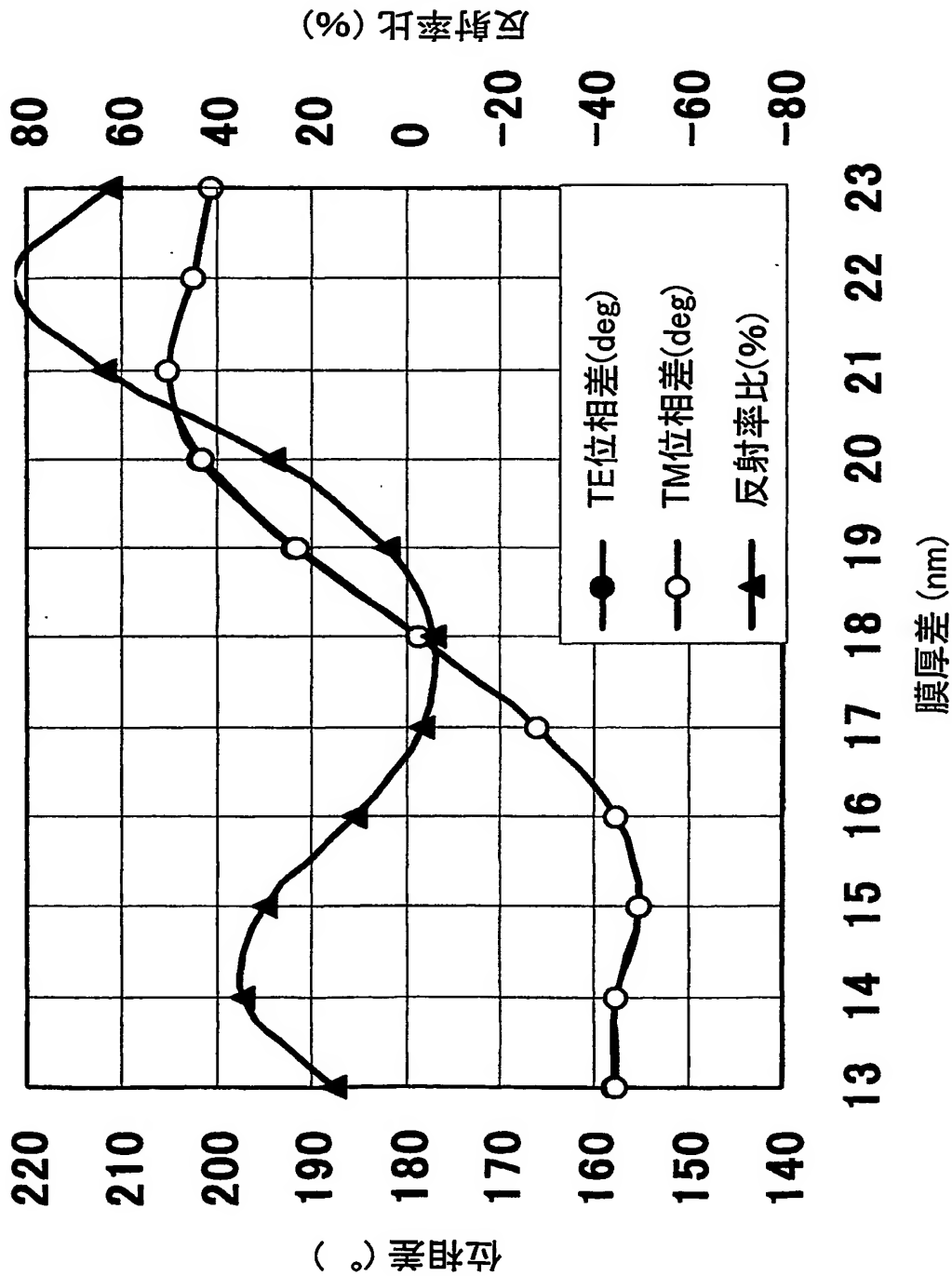


Fig.29

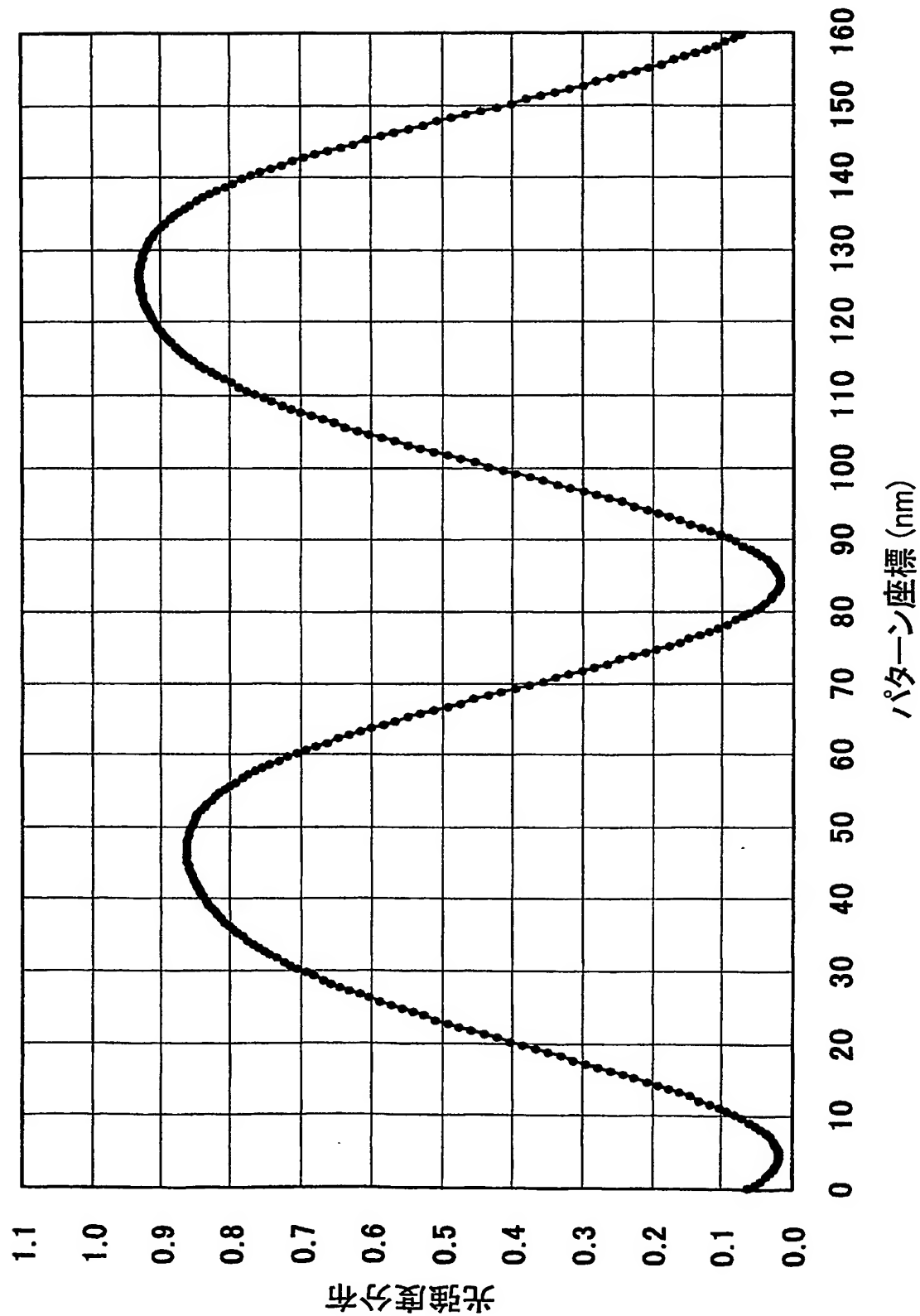


Fig.30

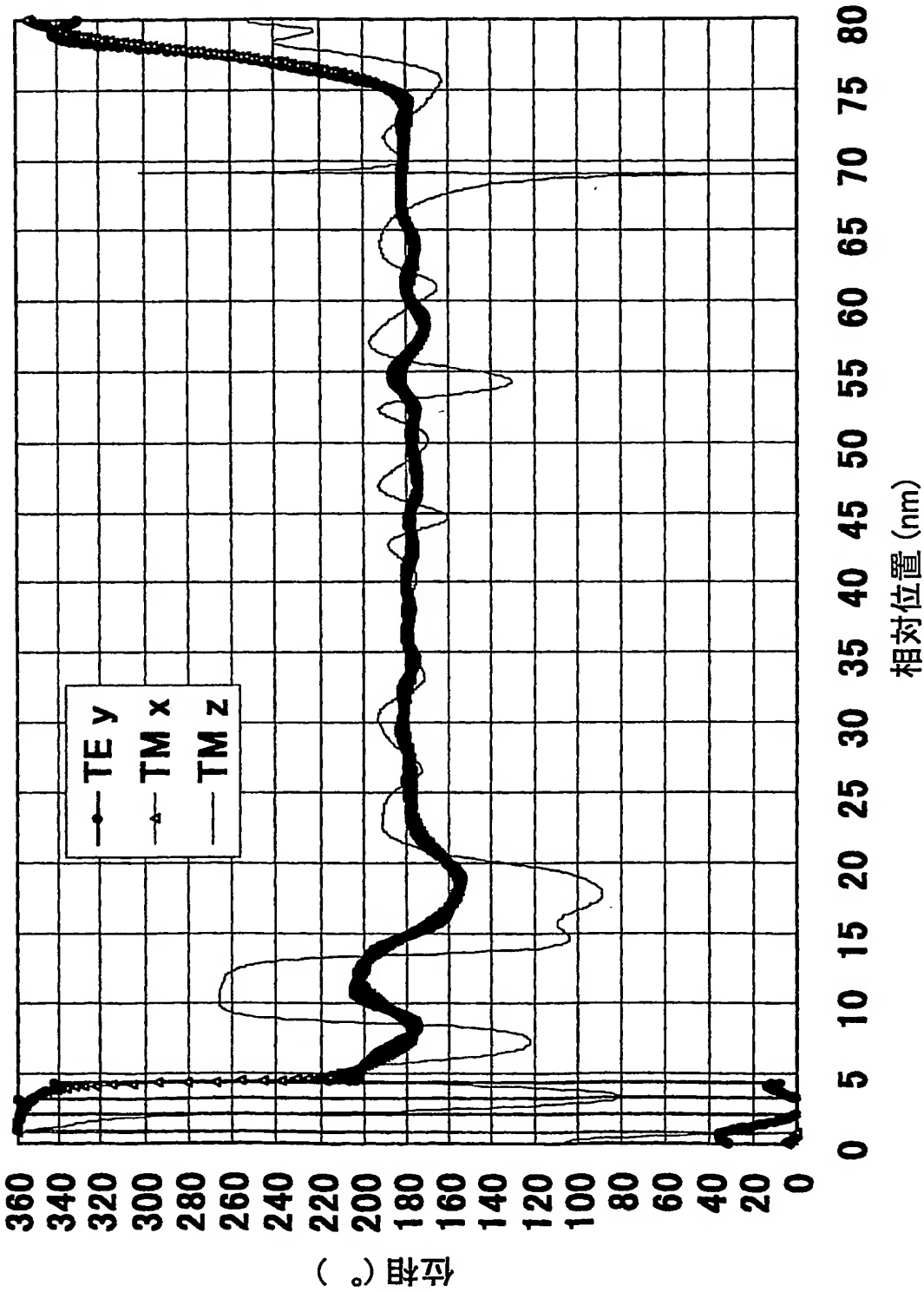


Fig.31

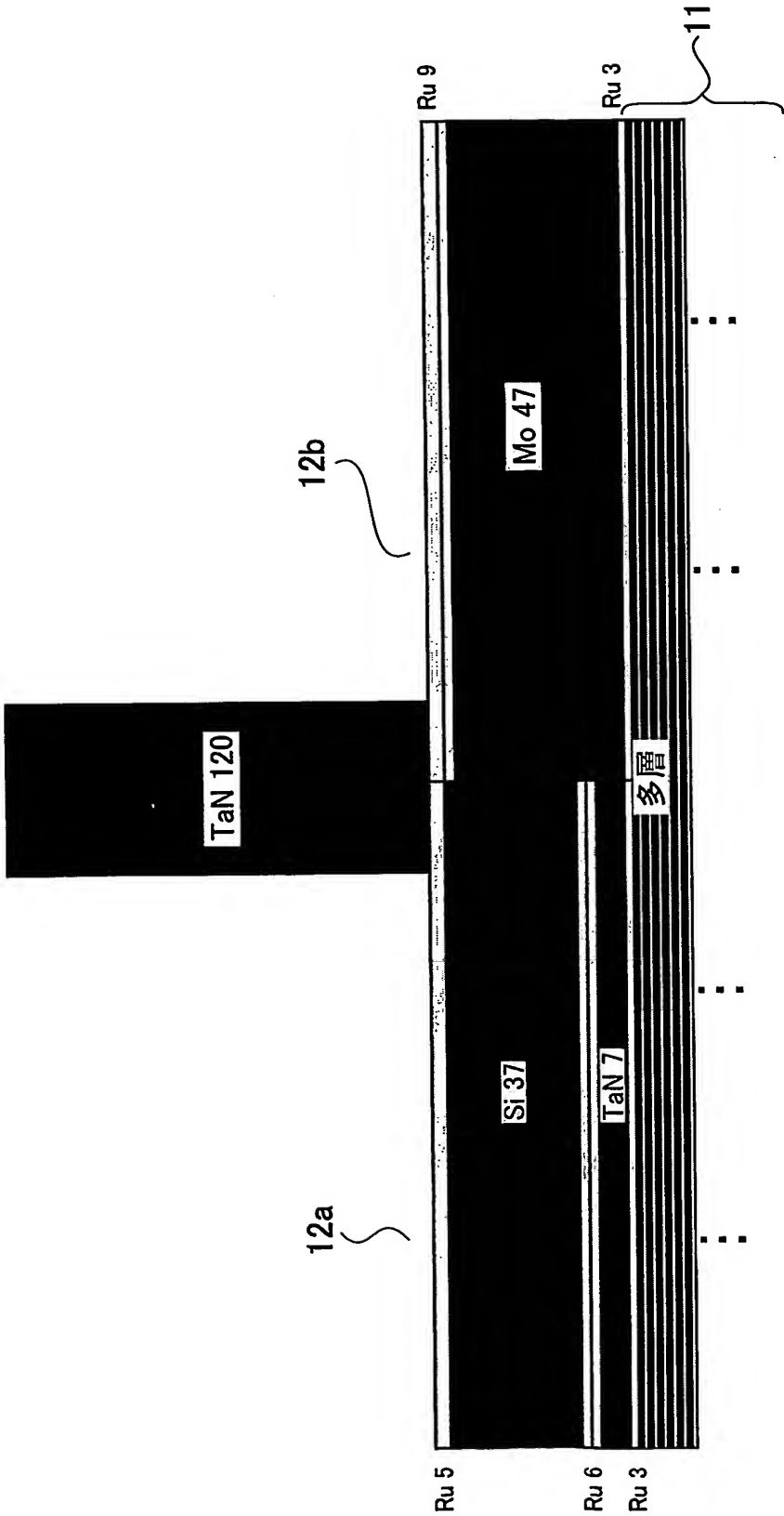


Fig.32

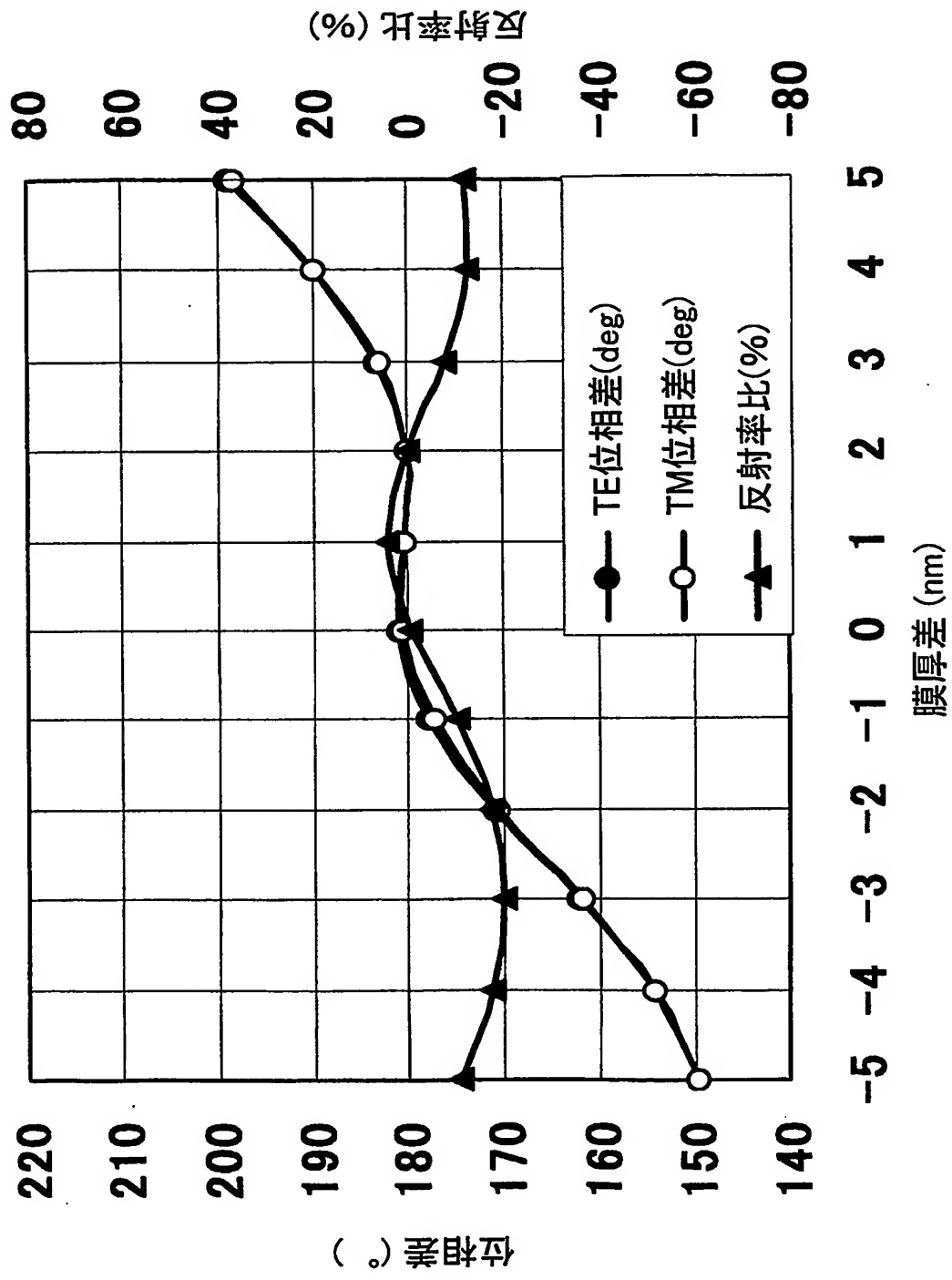


Fig.33

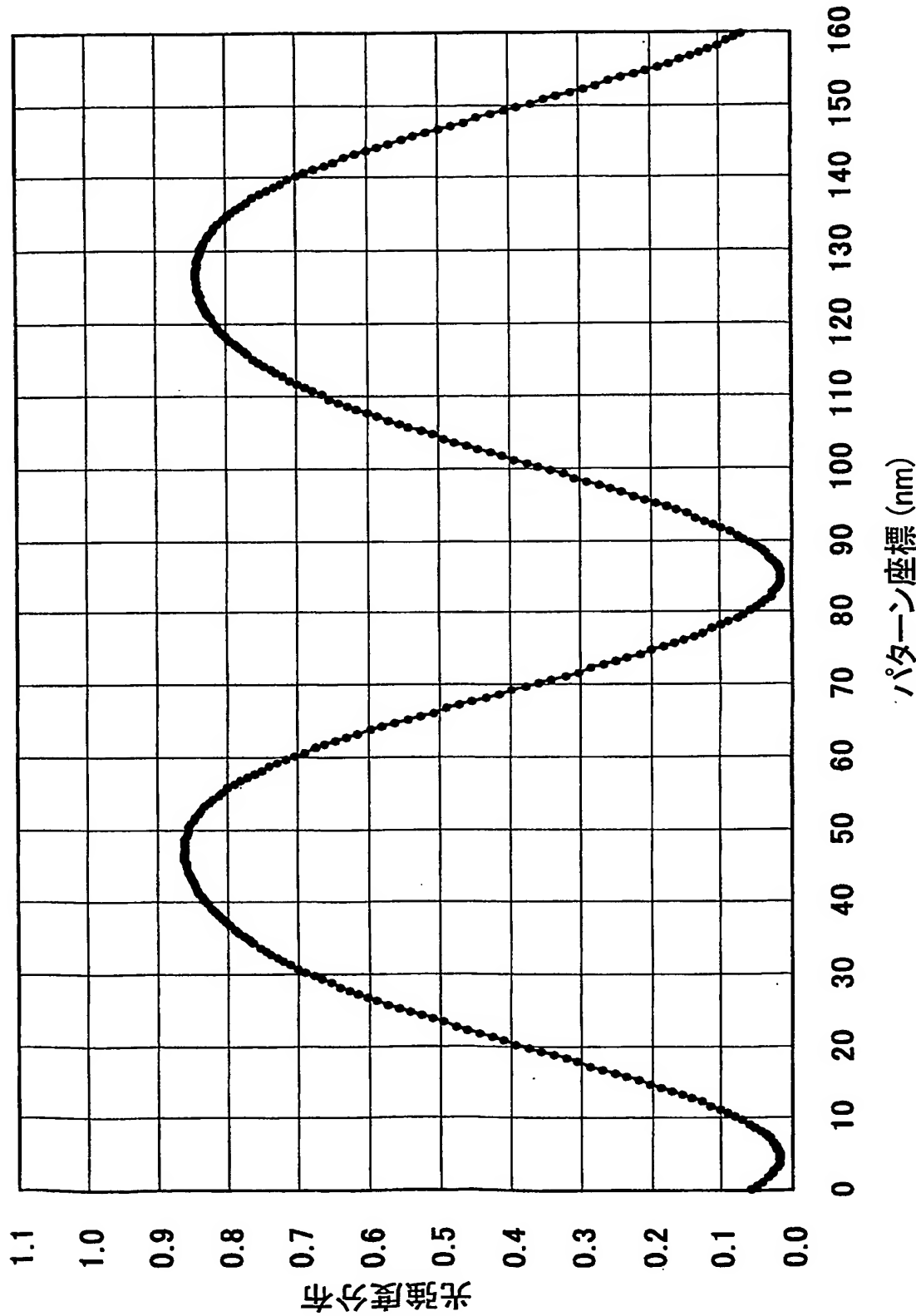


Fig.34

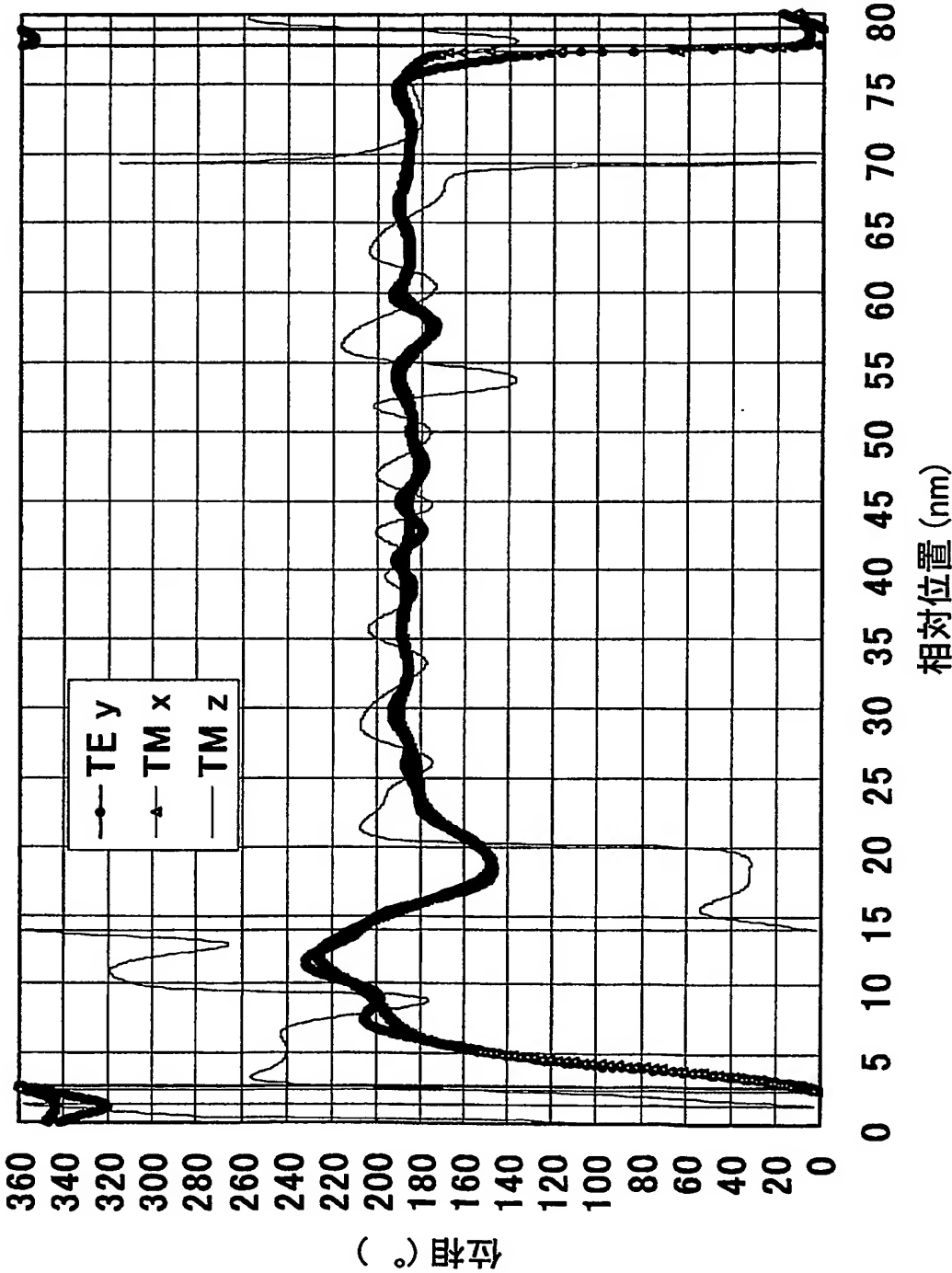


Fig.35

36/48



工程13 Ruコート

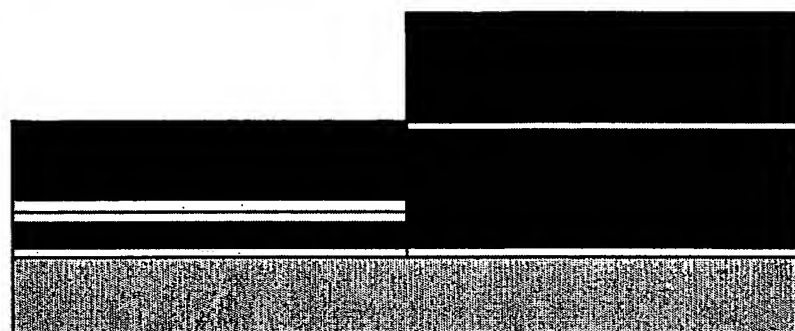
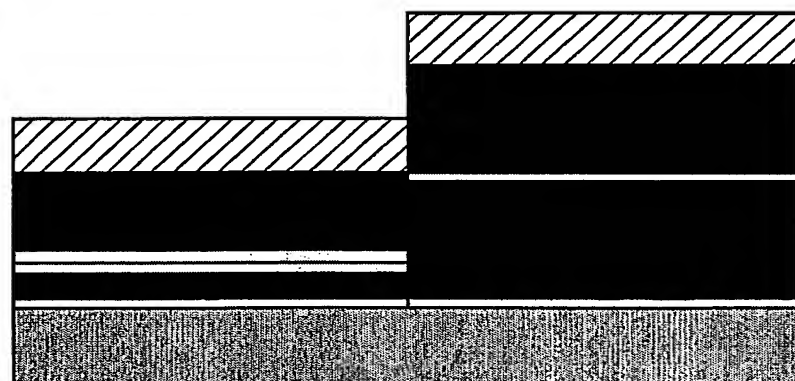
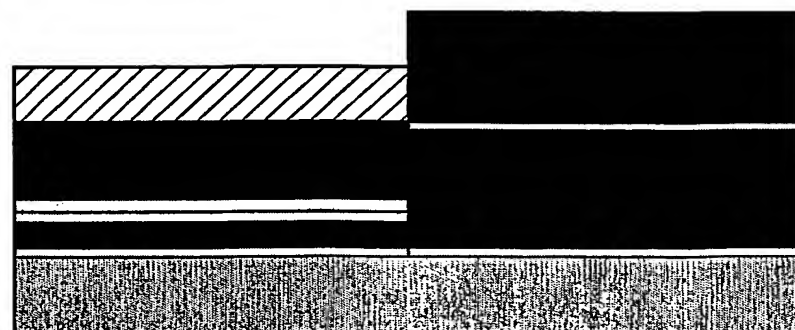
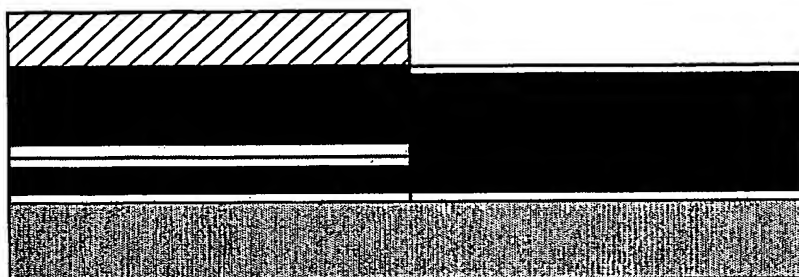
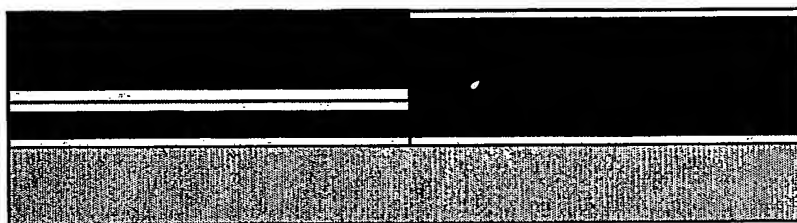
工程13-1
Siコート工程13-2
レジストコート工程13-3
レジストパターンニング

Fig.36

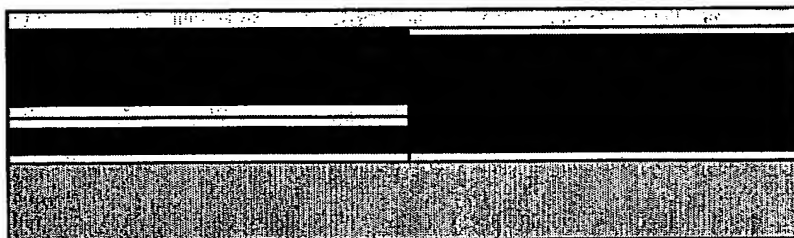
37/48



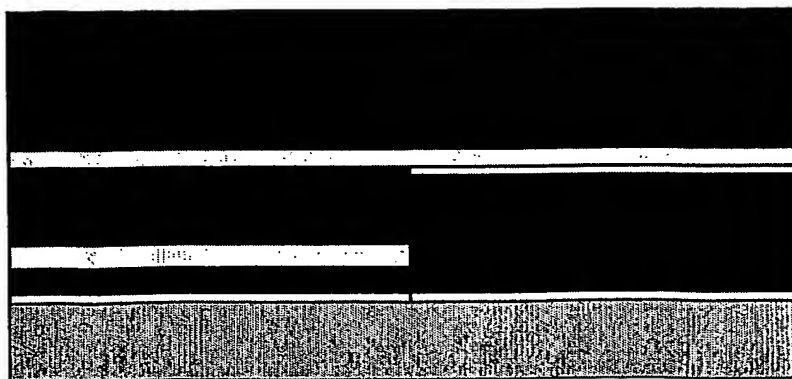
工程13-4
Siエッチング



工程13-5
レジスト剥離



工程13-6
Ruコート



工程14
TaNコート

Fig.37

38/48

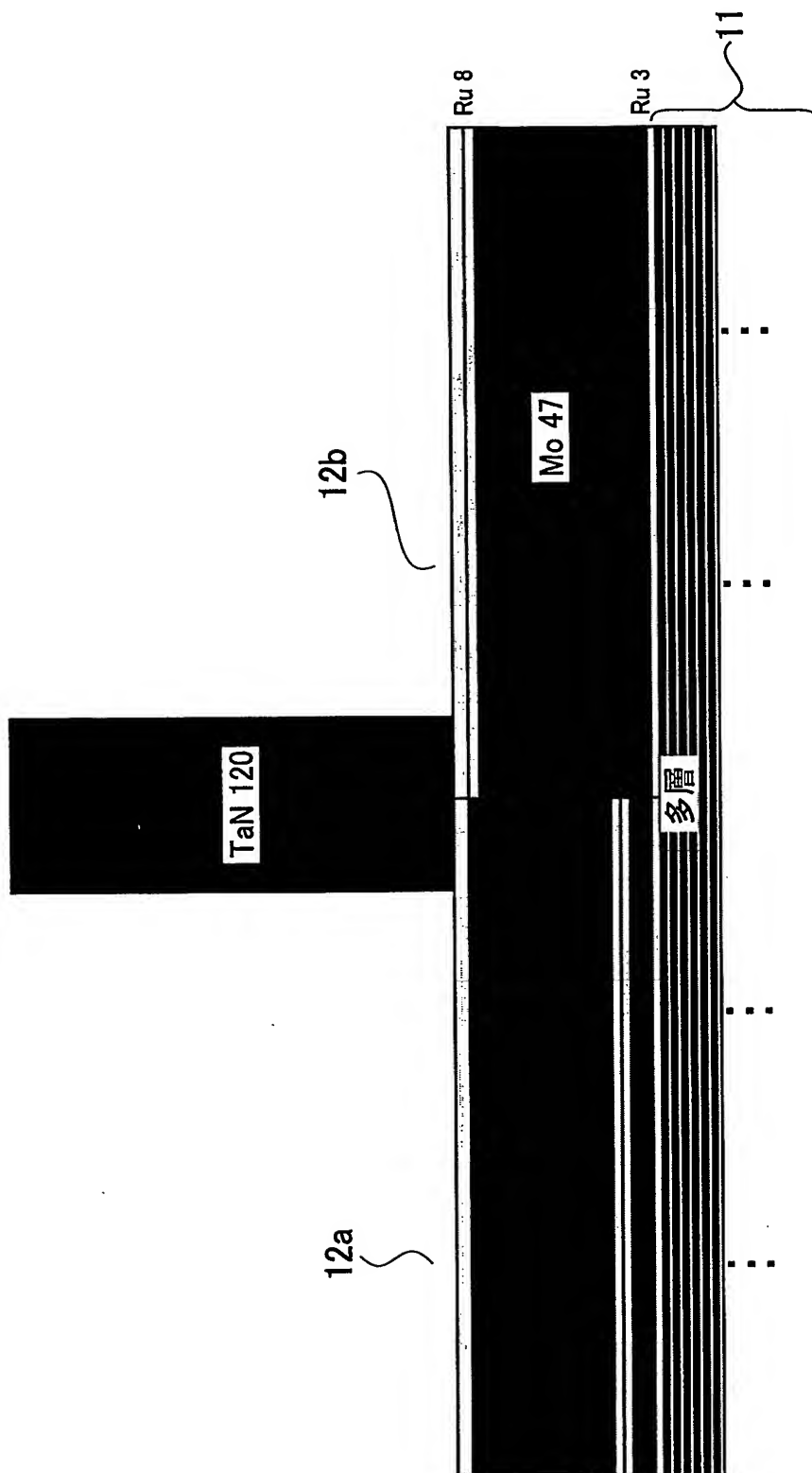


Fig.38

39/48

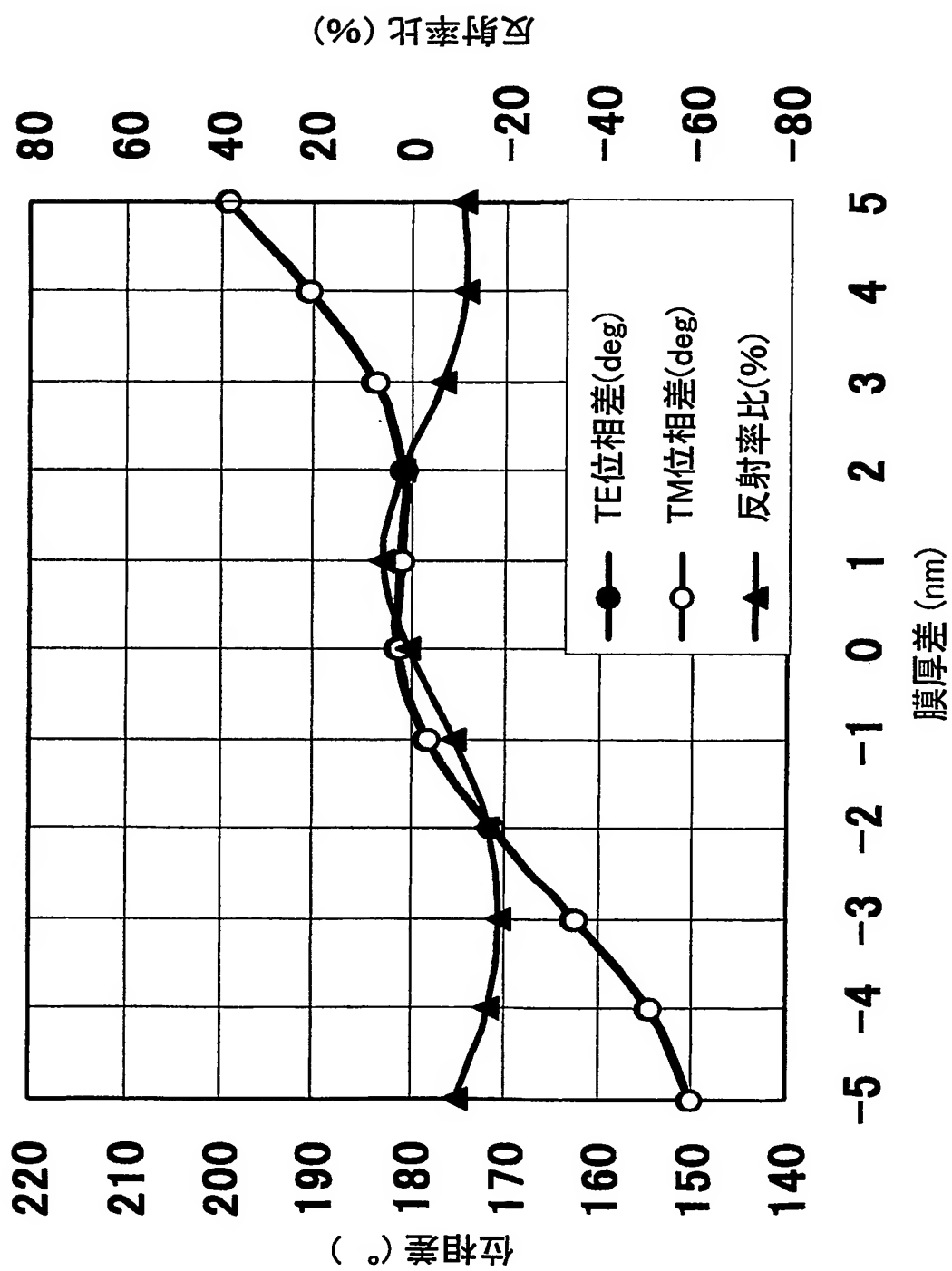


Fig.39

40/48

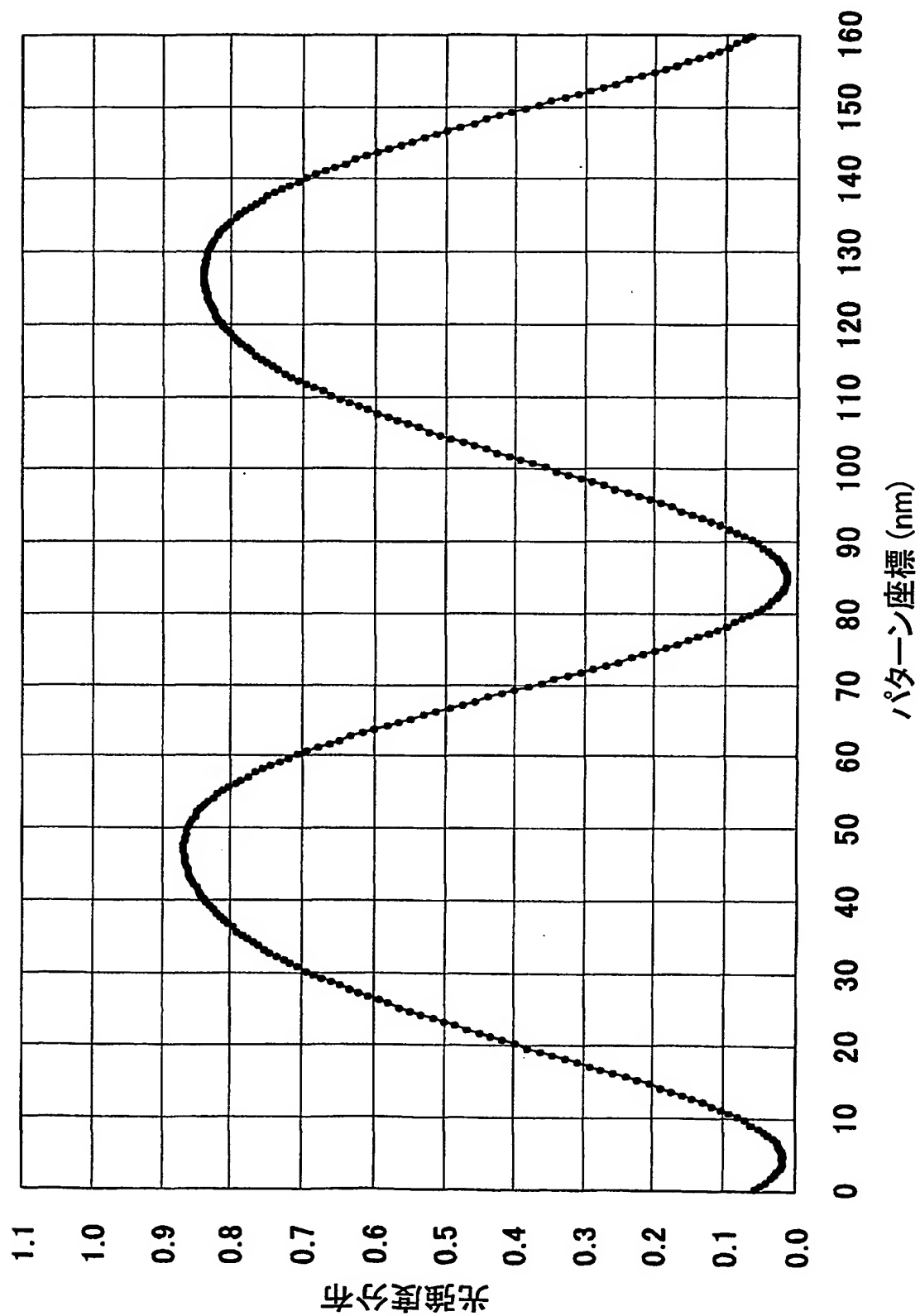


Fig.40

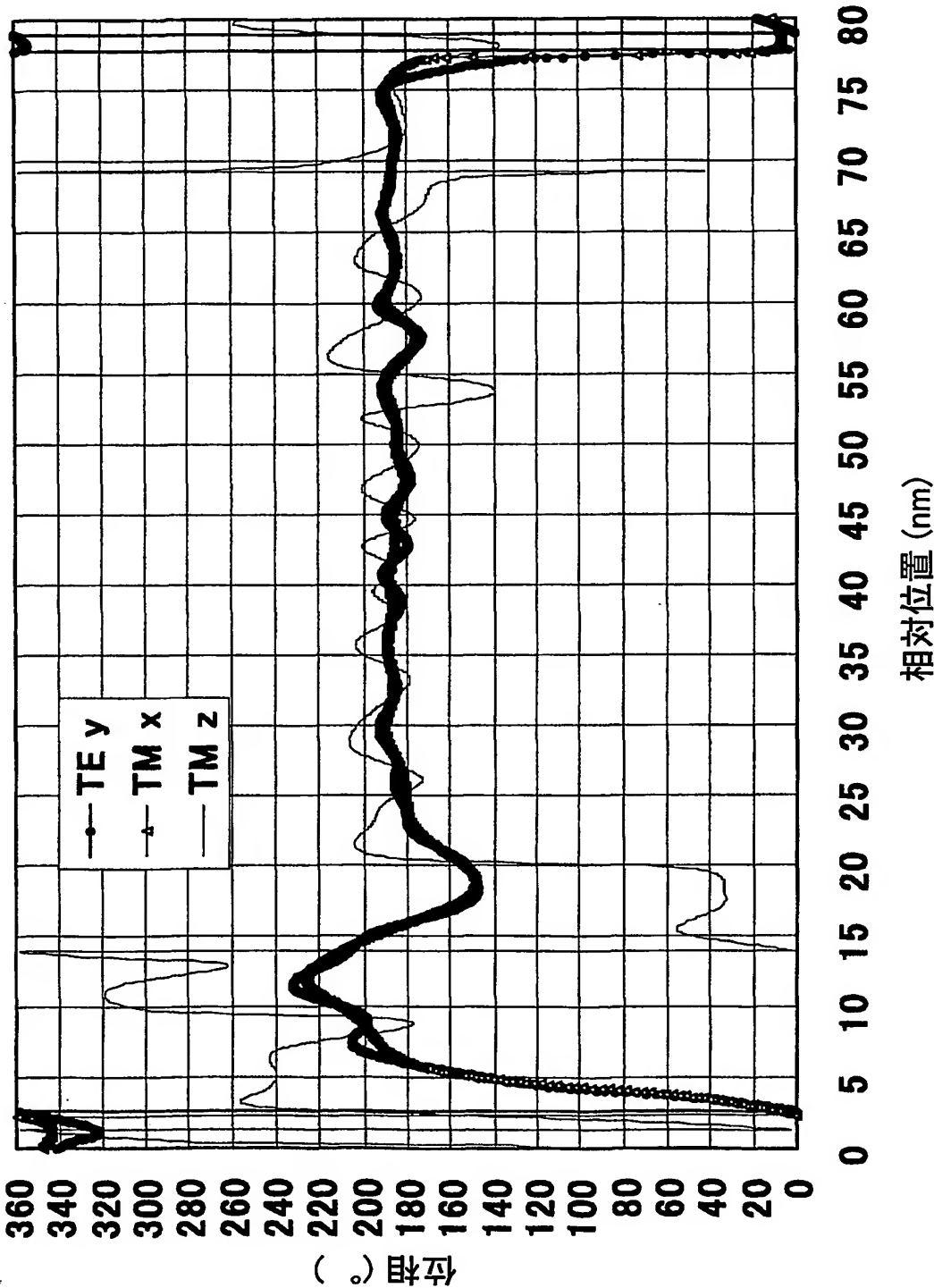


Fig.41

42/48

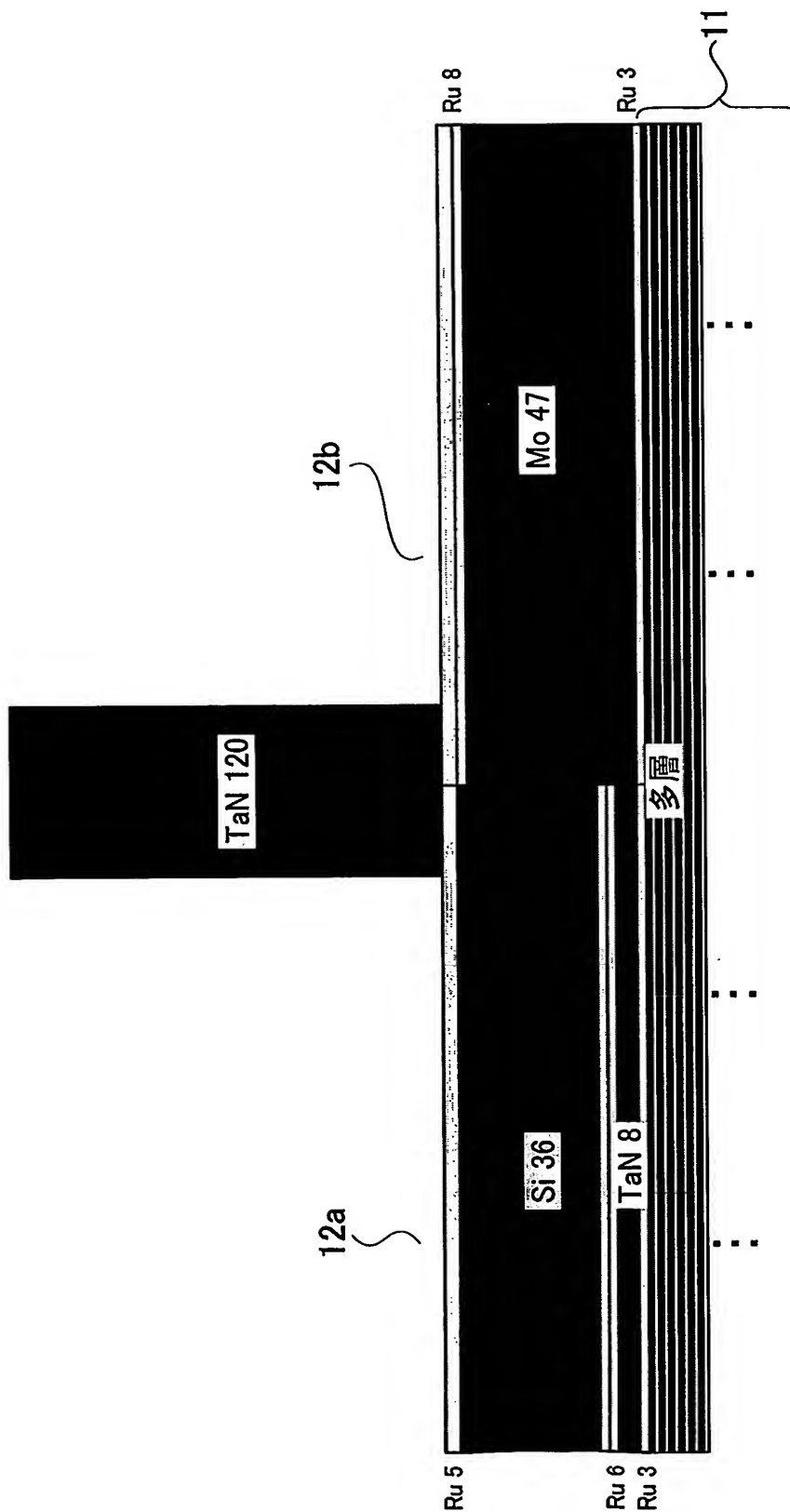


Fig.42

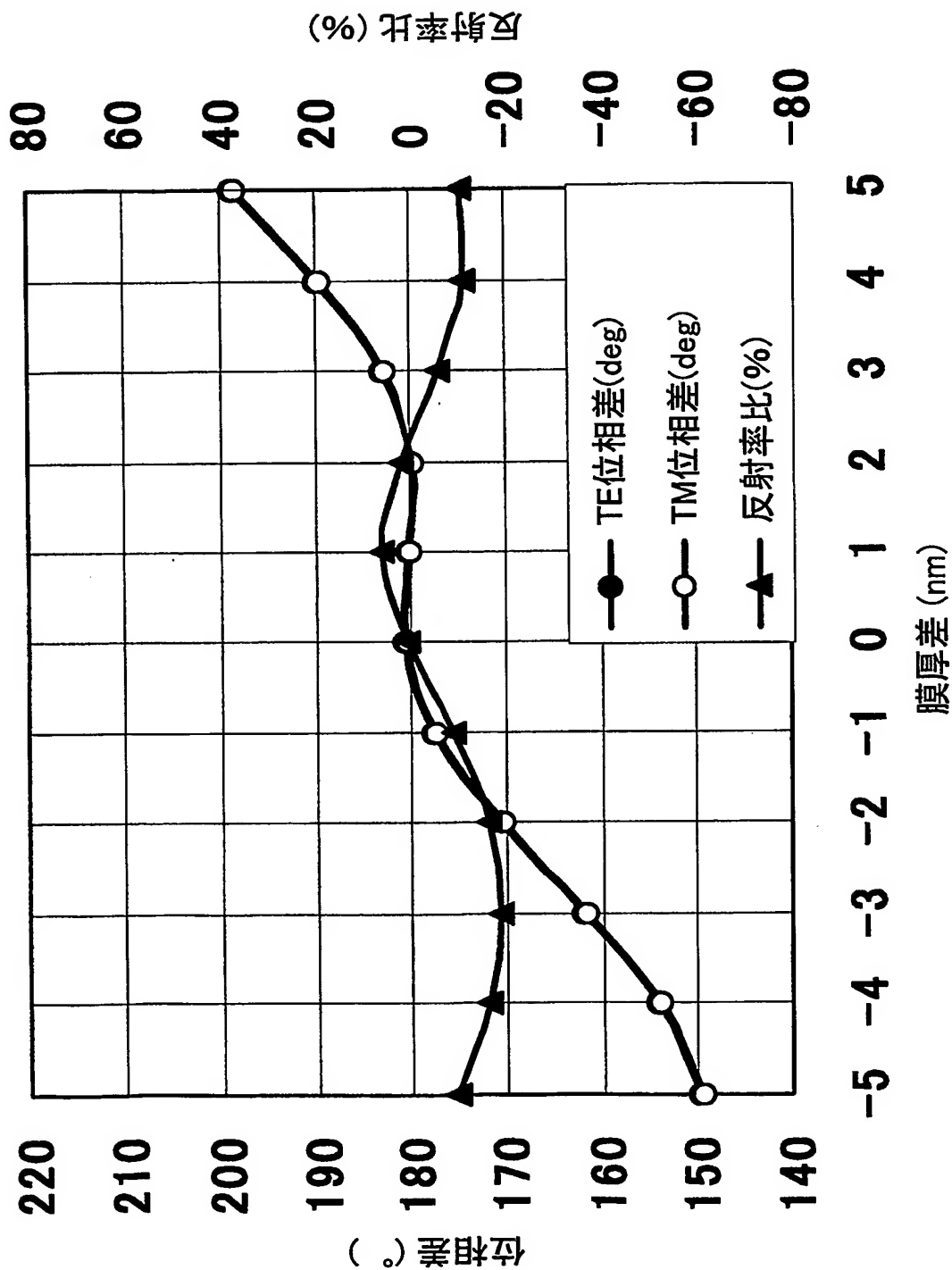


Fig.43

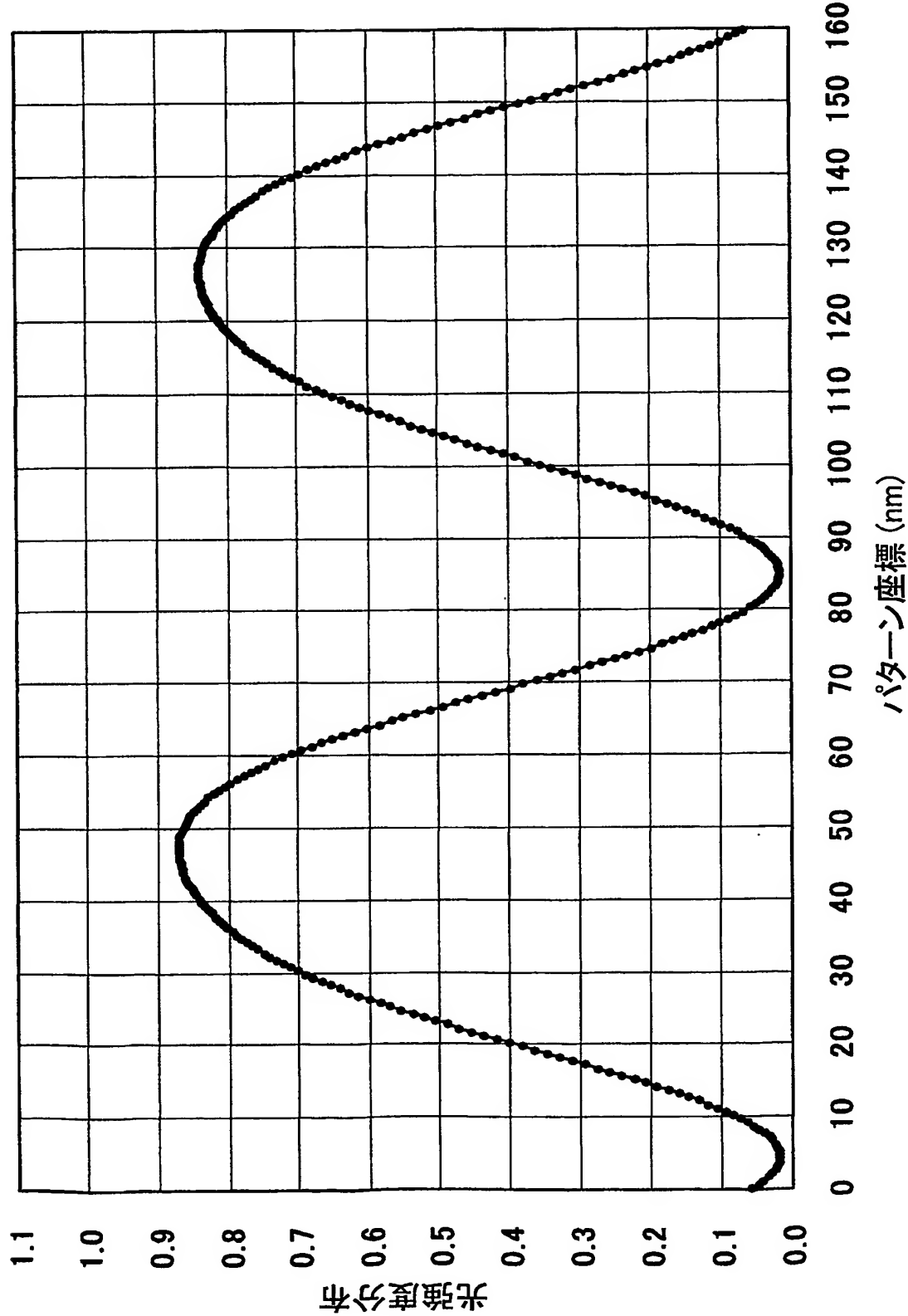


Fig.44

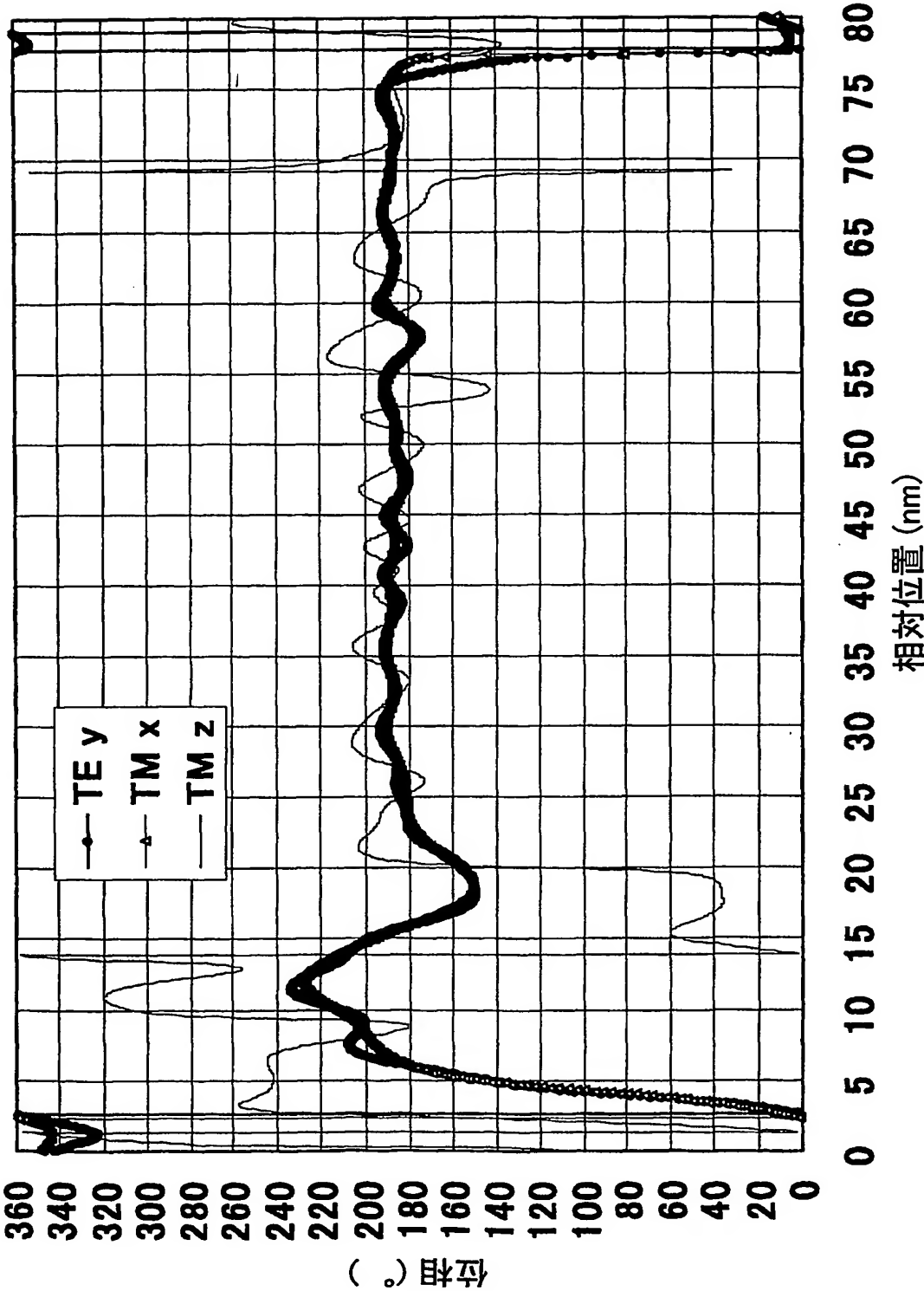


Fig.45

46/48

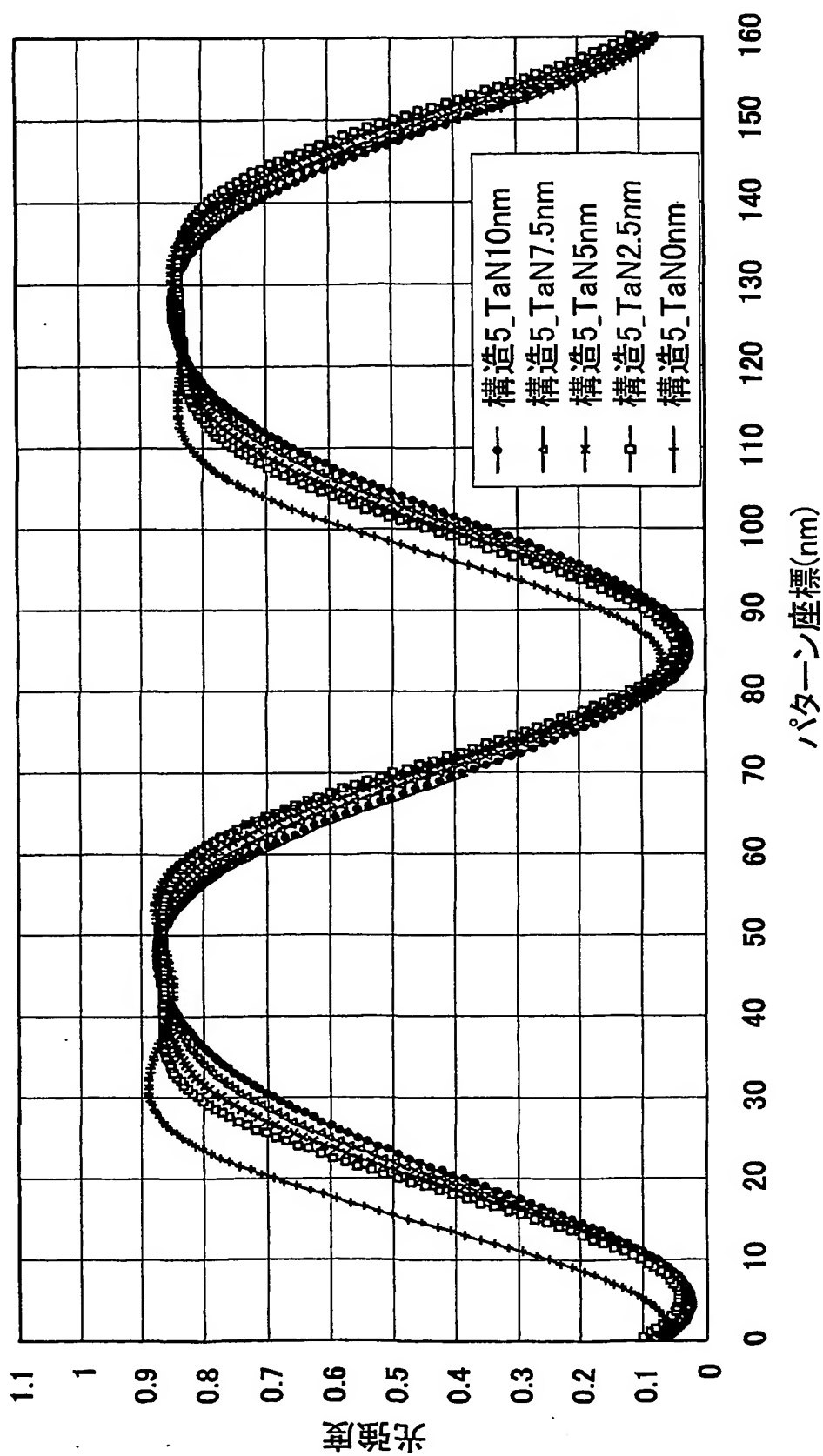


Fig.46

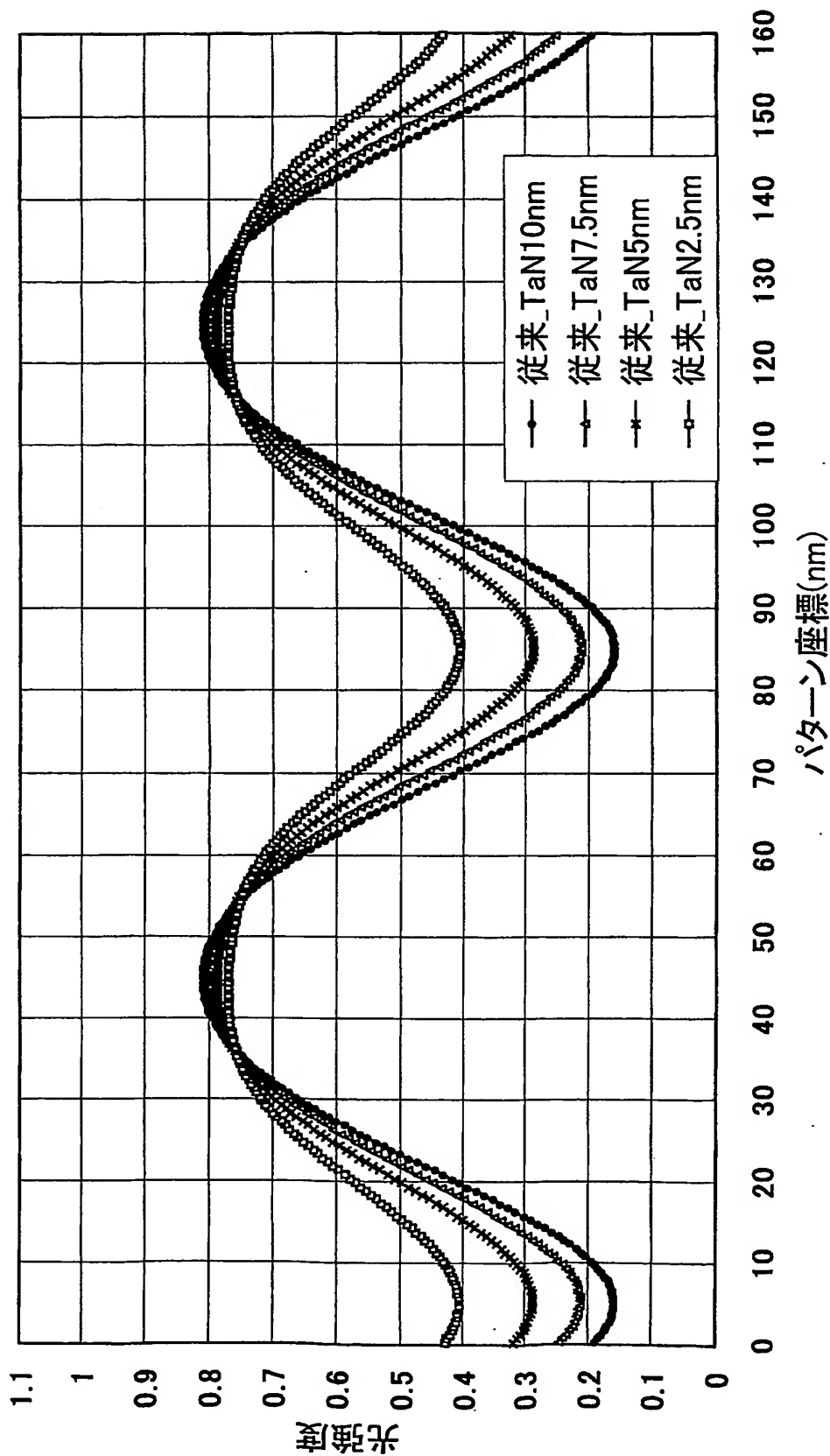


Fig.47

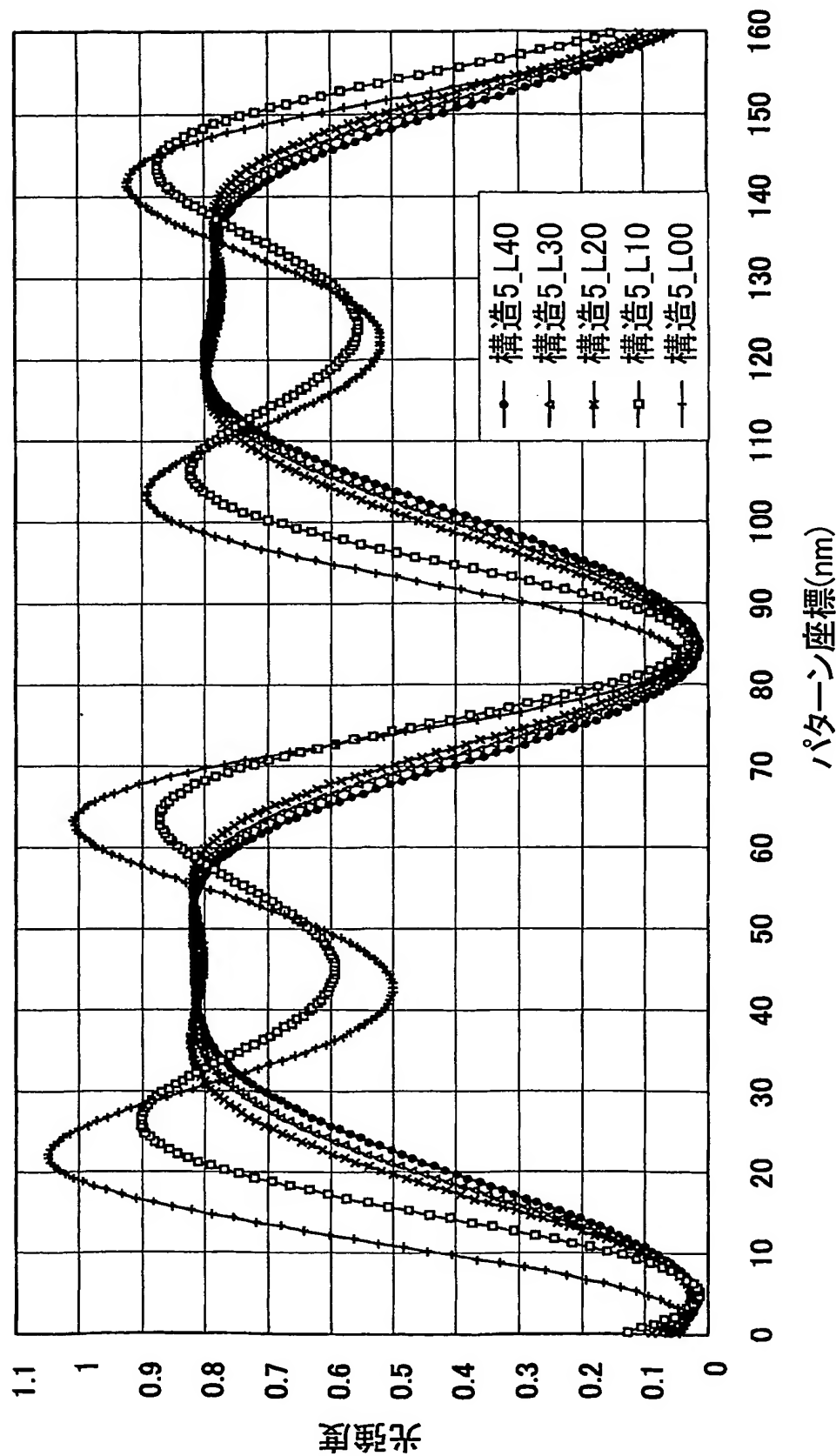


Fig.48

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP03/08377

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

Int.Cl⁷ G03F1/16, H01L21/027

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

Int.Cl⁷ G03F1/08, G03F1/16, H01L21/027

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

| | | | |
|---------------------------|-----------|----------------------------|-----------|
| Jitsuyo Shinan Koho | 1922-1996 | Jitsuyo Shinan Toroku Koho | 1996-2003 |
| Kokai Jitsuyo Shinan Koho | 1971-2003 | Toroku Jitsuyo Shinan Koho | 1994-2003 |

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

| Category* | Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages | Relevant to claim No. |
|-----------|--|--------------------------------|
| X | US 5399448 A (Nikon Corp.), 21 March, 1995 (21.03.95), | 1-3, 5, 8-10, 12, 15-17, 20 |
| Y | Column 4, line 65 to column 7, line 11; Figs. 3, 4 | 4, 11 |
| A | & JP 5-134385 A Par. Nos. [0024] to [0033]; Figs. 4, 5 | 6, 7, 13, 14, 18, 19 |
| X | US 5641593 A (Canon Kabushiki Kaisha), 24 June, 1997 (24.06.97), | 1, 2, 8-10, 12, 15-17, 20 |
| Y | Column 6, line 57 to column 7, line 40; Figs. 1, 3 | 3-5, 11 |
| A | & JP 7-114173 A Par. Nos. [0017] to [0021]; Figs. 1, 3 | 6, 7, 13, 14, 18, 19 |

☒ Further documents are listed in the continuation of Box C. ☐ See patent family annex.

| | |
|---|--|
| * Special categories of cited documents: | "T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention |
| "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance | "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone |
| "E" earlier document but published on or after the international filing date | "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art |
| "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified) | "&" document member of the same patent family |
| "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means | |
| "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed | |

Date of the actual completion of the international search
06 October, 2003 (06.10.03)

Date of mailing of the international search report
21 October, 2003 (21.10.03)

Name and mailing address of the ISA/
Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP03/08377

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

| Category* | Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages | Relevant to claim No. |
|-----------|---|---------------------------------|
| X | EP 708367 A1 (AT&T Corp.), 24 April, 1996 (24.04.96), | 1, 2, 5, 8-10, 12, 15-17, 20 |
| Y | Column 5, line 2 to column 7, line 17; Figs. 1, 2 | 3, 4, 11 |
| A | & JP 8-213312 A Par. Nos. [0020] to [0031]; Figs. 1, 2 & US 521031 A & DE 69501452 E | 6, 7, 13, 14, 18, 19 |
| Y | US 5514499 A (Kabushiki Kaisha Toshiba), 07 May, 1996 (07.05.96), Full text; all drawings & JP 7-319147 A & KR 168134 B1 | 1-5, 8-10, 12, 15-17, 20 |
| P, X | EP 1260861 A1 (ASML Netherlands B.V.), 27 November, 2002 (27.11.02), | 1-5, 8-10, 12, 15-17, 20 |
| P, Y | Full text; all drawings | 11 |
| P, A | & JP 2003-59822 A & US 2003/31938 A1 & KR 2003006968 A | 6, 7, 13, 14, 18, 19 |
| Y | JP 7-110571 A (Toppan Printing Co., Ltd.), 25 April, 1995 (25.04.95), Abstract (Family: none) | 3 |
| Y | US 5294506 A (Mitsubishi Denki Kabushiki Kaisha), 15 March, 1994 (15.03.94), Abstract; column 2, lines 15 to 54 & JP 4-313754 A Abstract; Par. No. [0009] | 3 |
| Y | JP 4-214559 A (Dainippon Printing Co., Ltd.), 05 August, 1992 (05.08.92), Abstract (Family: none) | 4 |
| Y | JP 9-311431 A (Toppan Printing Co., Ltd.), 02 December, 1997 (02.12.97), Par. No. [0018] (Family: none) | 11 |
| Y | US 5700605 A (Kabushiki Kaisha Toshiba), 23 December, 1997 (23.12.97), Column 7, lines 51 to 56 & JP 8-314116 A Par. No. [0029] & KR 197771 B1 & TW 399247 A | 11 |
| Y | JP 8-202016 A (Sony Corp.), 09 August, 1996 (09.08.96), Abstract (Family: none) | 11 |
| A | US 2002/045108 A1 (Byoung-taek Lee et al.), 18 April, 2002 (18.04.02), Abstract & JP 2002-122981 A & KR 2002029590 A | 1-20 |

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Internal application No.

ECT/JP03/08377

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

| Category* | Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages | Relevant to claim No. |
|-----------|---|-----------------------|
| A | US 6178221 B1 (Advanced Micro Devices, Inc.), 23 January, 2001 (23.01.01), Abstract (Family: none) | 1-20 |

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP03/08377

Box I Observations where certain claims were found unsearchable (Continuation of item 2 of first sheet)

This international search report has not been established in respect of certain claims under Article 17(2)(a) for the following reasons:

1. ☐ Claims Nos.:
because they relate to subject matter not required to be searched by this Authority, namely:
2. ☐ Claims Nos.:
because they relate to parts of the international application that do not comply with the prescribed requirements to such an extent that no meaningful international search can be carried out, specifically:
3. ☐ Claims Nos.:
because they are dependent claims and are not drafted in accordance with the second and third sentences of Rule 6.4(a).

Box II Observations where unity of invention is lacking (Continuation of item 3 of first sheet)

This International Searching Authority found multiple inventions in this international application, as follows:

Claims 1-20 has as a common feature a phase shift mask comprising a reflection multi-layer film substrate for reflecting a exposure light, and a first region and a second region formed on the substrate, wherein respective film thicknesses and complex refractive indexes of a formed film in the first region and a formed film in the second region are set so as to produce a specified phase difference between the reflection light of an exposure light in the first region and the reflection light of an exposure light in the second region.

However, the common feature is well known prior art and is not a special technical feature within the meaning of PCT Rule 13.2, second (continued to extra sheet)

1. ☒ As all required additional search fees were timely paid by the applicant, this international search report covers all searchable claims.
2. ☐ As all searchable claims could be searched without effort justifying an additional fee, this Authority did not invite payment of any additional fee.
3. ☐ As only some of the required additional search fees were timely paid by the applicant, this international search report covers only those claims for which fees were paid, specifically claims Nos.:
4. ☐ No required additional search fees were timely paid by the applicant. Consequently, this international search report is restricted to the invention first mentioned in the claims; it is covered by claims Nos.:

Remark on Protest ☐ The additional search fees were accompanied by the applicant's protest.
☒ No protest accompanied the payment of additional search fees.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP03/08377

Continuation of Box No.II of continuation of first sheet(1)

sentence. In addition, there exists no other common feature to be considered to be a special technical feature within the meaning of PCT Rule 13.2, second sentence, therefore no technical relationship within the meaning of PCT Rule 13 can be found among those different inventions

A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC))

Int. Cl⁷ G 0 3 F 1 / 1 6, H 0 1 L 2 1 / 0 2 7

B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料 (国際特許分類 (IPC))

Int. Cl⁷ G 0 3 F 1 / 0 8, G 0 3 F 1 / 1 6, H 0 1 L 2 1 / 0 2 7

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報 1922-1996年

日本国公開実用新案公報 1971-2003年

日本国実用新案登録公報 1996-2003年

日本国登録実用新案公報 1994-2003年

国際調査で使用した電子データベース (データベースの名称、調査に使用した用語)

C. 関連すると認められる文献

| 引用文献の カテゴリー* | 引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示 | 関連する 請求の範囲の番号 |
|-----------------|---|-----------------------------|
| X | US 5399448 A (Nikon Corporation) 1995. 03. 21 第4欄第65行-第7欄第11行、図3、4 | 1-3, 5, 8-10, 12, 15-17, 20 |
| Y | & JP 5-134385 A 【0024】-【0033】、図4、5 | 4, 11 |
| A | | 6, 7, 13, 14, 18, 19 |
| X | US 5641593 A (Canon Kabushiki kaisha) 1997. 06. 24 第6欄第57行-第7欄第40行、図1、3 | 1, 2, 8-10, 12, 15-17, 20 |
| Y | & JP 7-114173 A 【0017】-【0021】、図1、3 | 3-5, 11 |
| A | | 6, 7, 13, 14, 18, 19 |

☒ C欄の続きにも文献が列举されている。☐ パテントファミリーに関する別紙を参照。

* 引用文献のカテゴリー

「A」特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの

「E」国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの

「L」優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献 (理由を付す)

「O」口頭による開示、使用、展示等に言及する文献

「P」国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

の日の後に公表された文献

「T」国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの

「X」特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの

「Y」特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの

「&」同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日

06. 10. 03

国際調査報告の発送日

21.10.03

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁 (ISA / JP)

郵便番号 100-8915

東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官 (権限のある職員)

伊藤 昌哉

2M

8808

電話番号 03-3581-1101 内線 3274

C (続き) . 関連すると認められる文献

| 引用文献の カテゴリー* | 引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示 | 関連する 請求の範囲の番号 |
|-----------------|---|---------------------------------|
| X | EP 7 0 8 3 6 7 A 1 (AT&T Corp.) 1 9 9 6 . 0 4 . 2 4 第5欄第2行—第7欄第17行、図1、2 | 1, 2, 5, 8-10, 12, 15-17, 20 |
| Y | &JP 8-213312 A 【0020】—【0031】、図 | 3, 4, 11 |
| A | 1, 2 &US 5 2 1 0 3 1 A &DE 6 9 5 0 1 4 5 2 E | 6, 7, 13, 14, 18, 19 |
| Y | US 5 5 1 4 4 9 9 A (Kabushiki Kaisha Toshiba) 1 9 9 6 . 0 5 . 0 7 全文、全図 &JP 7-319147 A &KR 1 6 8 1 3 4 B 1 | 1-5, 8-10, 12, 15-17, 20 |
| PX | EP 1 2 6 0 8 6 1 A 1 (ASML Netherlands B.V.) 2 0 0 2 . 1 1 . 2 7 全文、全図 | 1-5, 8-10, 12, 15-17, 20 |
| PY | &JP 2 0 0 3 - 5 9 8 2 2 A | 11 |
| PA | &US 2 0 0 3 / 3 1 9 3 8 A 1 &KR 2 0 0 3 0 0 6 9 6 8 A | 6, 7, 13, 14, 1 8, 19 |
| Y | JP 7-110571 A (凸版印刷株式会社) 1 9 9 5 . 0 4 . 2 5 要約 (ファミリーなし) | 3 |
| Y | US 5 2 9 4 5 0 6 A (Mitsubishi Denki Kabushiki Kaish a) 1 9 9 4 . 0 3 . 1 5 要約、第2欄第15行—第54行 &JP 4-313754 A 要約、【0009】 | 3 |
| Y | JP 4-214559 A (大日本印刷株式会社) 1 9 9 2 . 0 8 . 0 5 要約 (ファミリーなし) | 4 |
| Y | JP 9-311431 A (凸版印刷株式会社) 1 9 9 7 . 1 2 . 0 2 【0018】 (ファミリーなし) | 11 |
| Y | US 5 7 0 0 6 0 5 A (Kabushiki Kaisha Toshiba) 1 9 9 7 . 1 2 . 2 3 第7欄第51行—第56行 &JP 8-314116 A 【0029】 &KR 1 9 7 7 7 1 B 1 &TW 3 9 9 2 4 7 A | 11 |
| Y | JP 8-202016 A (ソニー株式会社) 1 9 9 6 . 0 8 . 0 9 要約 (ファミリーなし) | 11 |
| A | US 2 0 0 2 / 0 4 5 1 0 8 A 1 (Byoung-taek Lee et al.) 2 0 0 2 . 0 4 . 1 8 要約 &JP 2 0 0 2 - 1 2 2 9 8 1 A &KR 2 0 0 2 0 2 9 5 9 0 A | 1-20 |
| A | US 6 1 7 8 2 2 1 B 1 (Advanced Micro Devices, Inc.) 2 0 0 1 . 0 1 . 2 3 要約 (ファミリーなし) | 1-20 |

第Ⅰ欄 請求の範囲の一部の調査ができないときの意見 (第1ページの2の続き)

法第8条第3項 (P C T 1 7 条(2) (a)) の規定により、この国際調査報告は次の理由により請求の範囲の一部について作成しなかった。

1. ☐ 請求の範囲 _____ は、この国際調査機関が調査することを要しない対象に係るものである。つまり、
2. ☐ 請求の範囲 _____ は、有意義な国際調査をすることができる程度まで所定の要件を満たしていない国際出願の部分に係るものである。つまり、
3. ☐ 請求の範囲 _____ は、従属請求の範囲であってP C T規則6.4(a)の第2文及び第3文の規定に従って記載されていない。

第Ⅱ欄 発明の単一性が欠如しているときの意見 (第1ページの3の続き)

次に述べるようにこの国際出願に二以上の発明があるところの国際調査機関は認めた。

請求の範囲1～20は、露光光を反射する反射多層膜基板と、当該反射多層膜基板上に形成された第1領域及び第2領域とを具備するとともに、前記第1領域の形成膜および前記第2領域の形成膜における各膜厚および各複素屈折が、前記第1領域での露光光の反射光と前記第2領域での露光光の反射光とで所定の位相差が生じるように設定されている位相シフトマスクを共通事項として有している。

しかし、上記共通事項は、従来から知られている先行技術であり、P C T規則13.2の第2文の意味において、特別な技術的特徴ではない。また、P C T規則13.2の第2文の意味において特別な技術的特徴と考えられる他の共通事項は存在しないので、それらの相違する発明の間にP C T規則13の意味における技術的な関係を見いだすことはできない。

1. ☒ 出願人が必要な追加調査手数料をすべて期間内に納付したので、この国際調査報告は、すべての調査可能な請求の範囲について作成した。
2. ☐ 追加調査手数料を要求するまでもなく、すべての調査可能な請求の範囲について調査することができたので、追加調査手数料の納付を求めなかった。
3. ☐ 出願人が必要な追加調査手数料を一部のみしか期間内に納付しなかったため、この国際調査報告は、手数料の納付のあった次の請求の範囲のみについて作成した。
4. ☐ 出願人が必要な追加調査手数料を期間内に納付しなかったため、この国際調査報告は、請求の範囲の最初に記載されている発明に係る次の請求の範囲について作成した。

追加調査手数料の異議の申立てに関する注意

- ☐ 追加調査手数料の納付と共に出願人から異議申立てがあった。
- ☒ 追加調査手数料の納付と共に出願人から異議申立てがなかった。